

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2022 - Thèse n° 097

APPROVISIONNEMENT DE NOS SOCIÉTÉS EN PÉTROLE ET AVENIR : QUELLES CONSÉQUENCES SUR LA PROFESSION VÉTÉRINAIRE ?

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 18 novembre 2022
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

MISTRAL Jolan

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2022 - Thèse n° 097

APPROVISIONNEMENT DE NOS SOCIÉTÉS EN PÉTROLE ET AVENIR : QUELLES CONSÉQUENCES SUR LA PROFESSION VÉTÉRINAIRE ?

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 18 novembre 2022
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

MISTRAL Jolan

Liste des enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon (14-09-2022)

Pr	ABITBOL	Marie	Professeur
Dr	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Pr	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Dr	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Dr	BECKER	Claire	Maître de conférences
Dr	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Dr	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
Pr	BENOIT	Etienne	Professeur
Pr	BERNY	Philippe	Professeur
Pr	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	Professeur
Dr	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
Dr	BRUTO	Maxime	Maître de conférences
Dr	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
Pr	BUFF	Samuel	Professeur
Pr	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
Dr	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
Pr	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Pr	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
Pr	CHABANNE	Luc	Professeur
Pr	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
Dr	CHAMEL	Gabriel	Maître de conférences
Dr	CHETOT	Thomas	Maître de conférences
Dr	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Maître de conférences
Pr	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Pr	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Dr	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
Dr	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
Dr	GALIA	Wessam	Maître de conférences
Pr	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
Dr	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Dr	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Dr	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Dr	JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargé d'enseignement contractuel
Pr	JUNOT	Stéphane	Professeur
Pr	KODJO	Angeli	Professeur
Dr	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Dr	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Dr	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Pr	LE GRAND	Dominique	Professeur
Pr	LEBLOND	Agnès	Professeur
Dr	LEDOUX	Dorothee	Maître de conférences
Dr	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Dr	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
Dr	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
Pr	LEPAGE	Olivier	Professeur
Pr	LOUZIER	Vanessa	Professeur
Dr	LURIER	Thibaut	Maître de conférences
Dr	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
Pr	MARCHAL	Thierry	Professeur
Dr	MOSCA	Marion	Maître de conférences
Pr	MOUNIER	Luc	Professeur
Dr	PEROZ	Carole	Maître de conférences
Pr	PIN	Didier	Professeur
Pr	PONCE	Frédérique	Professeur
Pr	PORTIER	Karine	Professeur
Dr	POUZOT-NEVORET	Céline	Maître de conférences
Pr	PROUILLAC	Caroline	Professeur
Pr	REMY	Denise	Professeur
Dr	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
Pr	ROGER	Thierry	Professeur
Dr	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
Pr	SCHRAMME	Michael	Professeur
Pr	SERGEANTET	Delphine	Professeur
Dr	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Dr	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
Pr	VIGUIER	Eric	Professeur
Dr	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothee	Chargé d'enseignement contractuel
Pr	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements

A monsieur le Professeur Alain Calender

Professeur de la Faculté de Médecine de Lyon

Qui nous fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Mes hommages respectueux.

A Madame Denise Rémy

Professeur du campus vétérinaire de VetAgro Sup

Pour avoir accepté de suivre et corriger ce travail.

Merci pour vos encouragements,

Veillez recevoir ma chaleureuse reconnaissance.

A Monsieur Pierre Bruyère

Professeur du campus vétérinaire de VetAgro Sup

Pour vos qualités humaines et d'avoir accepté d'évaluer ce travail,

Mes plus sincères remerciements.

Table des matières

Table des matières	6
Table des figures	10
Table des tableaux	12
Liste des abréviations.....	13
Introduction.....	14
Partie 1 : Evolutions de la place du pétrole dans notre société	15
1. Une ressource essentielle	15
1.1. Nature et exploitation du pétrole	15
1.1.1. Géologie du pétrole.....	15
1.1.2. Les différents types de pétrole	16
1.1.2.1. Définition du pétrole brut conventionnel.....	16
1.1.2.2. Les pétroles non conventionnels.....	16
1.1.3. Raffinage et produits pétroliers.....	16
1.2. Intérêt du pétrole	17
1.2.1. Notion d'énergie.....	17
1.2.2. La forte densité énergétique du pétrole	18
1.2.3. L'état liquide du pétrole.....	18
1.3. Importance du pétrole dans l'essor des activités humaines	18
1.3.1. Utilisation pré-industrielle du pétrole.....	18
1.3.2. Corrélation entre la « grande accélération » et la massification de la production de pétrole.	18
1.3.3. Source d'énergie abondante et bon marché.....	20
1.3.4. Energie des transports : le système sanguin de l'économie.....	20
1.3.5. Corrélation entre le PIB et la consommation d'énergie	21
1.3.6. Part dans le mix énergétique global	23
2. Une ressource finie	23
2.1. Un stock non renouvelable	23
2.2. Le concept de pic pétrolier.....	24
2.2.1. Modèle de King Hubbert	24
2.2.2. Les différentes phases de la courbe	24
2.2.3. Applicabilité du modèle	25
2.3. Dater le pic mondial	26
2.3.1. Controverses historiques entre prévisions « pessimistes » et « optimistes »	26
2.3.2. Estimation des réserves ultimes récupérables.....	28
2.3.3. Prévision de l'évolution de la demande	29
2.4. Etat des lieux.....	29
2.4.1. Maturité des champs découverts	29
2.4.2. Décroissance du taux de découvertes	30
2.4.3. Croissance de la demande	31
2.4.4. Date du pic du pétrole brut.....	31
2.4.5. Perspectives pour les pétroles non conventionnels	32
2.4.6. Prévisions récentes	34

3.	Perspectives d’approvisionnement de l’Union Européenne.....	36
3.1.	Pays fournisseurs et maturité de leurs réserves	36
3.2.	Prévisions à moyen et long terme	38
3.3.	Synthèse pour l’Union Européenne.....	39
4.	L’approvisionnement de l’Union Européenne en gaz naturel.....	40
5.	Comment évaluer les conséquences du pic pétrolier.....	42
5.1.	Les problématiques soulevées	42
5.2.	Evolution de la disponibilité en pétrole.....	43
5.3.	Limites des théories économiques de l’innovation et de la substitution	43
5.4.	De nombreux secteurs dépendants des produits pétroliers	44
5.4.1.	Différents niveaux de dépendance.....	44
5.4.2.	Cas particulier des transports	45
5.5.	Dépendance du système économique à la croissance.....	46
5.6.	Gérer l’incertitude : analyse de risque et échelle de temps.....	47
Partie 2 : Dépendances de la profession vétérinaire au pétrole et conséquences d’une contraction de son approvisionnement		49
1.	Pauvreté de la recherche associant pic pétrolier et secteur médical	49
2.	Impact du pic pétrolier sur la dépendance directe de la pratique vétérinaire aux transports	49
2.1.	Intervention des transports dans les activités quotidiennes d’une clinique..	49
2.1.1.	Les déplacements des travailleurs.....	49
2.1.2.	Les déplacements de la clientèle	50
2.1.3.	Les déplacements professionnels	50
2.1.4.	Les livraisons de matériel et médicaments	51
2.2.	Impact du pic pétrolier et bouleversements attendus	51
2.2.1.	Vulnérabilité du secteur des transports au pic pétrolier	51
2.2.2.	Hausse du prix du déplacement	52
2.2.3.	Hausse du prix du matériel et des médicaments	52
2.2.4.	Risques de pénuries	52
2.2.5.	Baisse du budget et du temps de la clientèle	53
2.3.	Epuisement à long terme de l’approvisionnement en carburant : réorganisation nécessaire des modes de déplacements	53
2.3.1.	Evaluation de la viabilité des modes alternatifs de transport pour la mobilité légère.....	53
2.3.1.1.	Voiture électrique à batterie	53
2.3.1.2.	Autres carburants alternatifs	56
2.3.1.3.	Utilisation des biocarburants	56
2.3.2.	Réflexion d’échelle et impact climatique	57
2.3.3.	Optimisation des déplacements au sein d’une clinique	59
2.3.4.	Mise en place de nouvelles pratiques vétérinaires	61
2.3.5.	Evolution du modèle structurel du maillage vétérinaire français.....	62
3.	Impact du pic pétrolier sur la dépendance directe de la pratique vétérinaire à l’industrie pétrochimique	64
3.1.	Importance des produits pétrochimiques dans le secteur médical.....	64
3.1.1.	L’industrie pétrochimique.....	64
3.1.2.	Intérêt et usages des matériaux dérivés de l’industrie plasturgique dans le secteur médical.....	64

3.1.3.	Utilisation de médicaments	65
3.2.	Vulnérabilité de l'industrie pétrochimique au pic pétrolier	66
3.2.1.	Dépendance à la ressource pétrole	66
3.2.2.	Essor majeur attendu dans la pétrochimie	66
3.2.3.	Voies de production alternatives et réflexion d'échelle.....	67
3.3.	Impact sur le système de santé et application à la profession vétérinaire	68
3.3.1.	Impact historique des crises pétrolières sur le système de soins	68
3.3.2.	Secteur privilégié en cas de restriction de ressources.....	69
3.3.3.	Conséquences attendues du pic pétrolier.....	69
3.3.4.	Réorganisation nécessaire de la gestion du matériel et des stocks d'une clinique vétérinaire.....	70
3.3.5.	Dégradation de la qualité du service.....	71
4.	Modification du secteur agricole et des filières d'intérêt vétérinaire	71
4.1.	Pratique vétérinaire intégrée au secteur de l'agriculture.....	71
4.2.	Dépendance majeure du système agro-alimentaire aux hydrocarbures.....	72
4.2.1.	Notion de système agro-alimentaire.....	72
4.2.2.	Perte de l'autonomie énergétique du secteur de l'agriculture lors de la révolution agricole du XXe siècle	73
4.2.3.	Gains de productivité du système	74
4.2.4.	Changement alimentaire : coût énergétique de la production de produits d'origine animale.....	75
4.2.5.	Vulnérabilité au pic pétrolier : vers une insécurité alimentaire.....	76
4.3.	Limites de l'innovation technique.....	78
4.3.1.	Faible perspective d'amélioration de l'efficacité énergétique de la production d'engrais.	78
4.3.2.	Atteinte d'un plateau dans la production de la photosynthèse	78
4.3.3.	Difficultés de l'électrification du système agro-alimentaire	79
4.3.4.	Nécessaire réorganisation interne du système.....	80
4.4.	Exemple d'une agriculture contrainte par une pénurie de ressources et de pétrole : Le cas de Cuba.....	80
4.4.1.	Une agriculture industrialisée.....	80
4.4.2.	Chute du bloc socialiste et effondrement de l'agriculture	81
4.4.3.	Transformation de l'agriculture dans les années 1990.....	82
4.4.4.	Résurgence de la traction animale	84
4.4.5.	Leçons à tirer et limites de leur applicabilité en Europe	85
4.5.	Perspective d'évolution en France à court puis long terme.....	86
4.5.1.	Mise sous tension du système agro-alimentaire	86
4.5.2.	A court terme : renforcement paradoxal des structures les plus industrialisées.....	87
4.5.3.	Nécessité à long terme d'équilibrer la consommation d'énergie de l'agriculture par transition vers des sources d'énergie interne.....	88
4.5.4.	Utilisation ciblée de biocarburants de première génération	90
4.5.5.	Conflit entre alimentation animale et alimentation humaine	91
4.6.	Bouleversement du système d'élevage et de la pratique vétérinaire rural ...	92
4.6.1.	La suppression des concentrés et des fourrages annuels pour les animaux de production	92
4.6.2.	Quasi-disparition des productions monogastriques.....	93
4.6.3.	La place de l'élevage bovin	94
4.6.3.1.	Réduction majeure des rendements laitiers.....	94

4.6.3.2.	Relative résilience du modèle d'élevage allaitant français	95
4.6.3.3.	Changement d'échelle de la production	96
4.6.4.	Emergence d'une filière de traction animale et d'un cheptel de trait	97
4.6.5.	Démassification du cheptel.....	98
4.7.	Incertitudes quant aux tendances d'évolution	98
5.	La possibilité d'une crise non maîtrisée	98
5.1.	Des conséquences largement imprévisibles	98
5.1.1.	Transversalité des impacts du pic pétrolier	98
5.1.2.	Intersection avec d'autres enjeux	99
5.2.	Des avertissements ignorés par les économistes et la classe politique.....	100
5.3.	Opérer des transitions dans un contexte de crise	102
5.3.1.	Contraction énergétique	102
5.3.2.	Récession économique.....	102
5.3.3.	Instabilité politique	103
5.4.	Conséquence sur les plans de transition.....	104
6.	Quelle représentation de ces enjeux par la profession vétérinaire ?.....	104
6.1.	Discussions en cours autour du futur de la pratique vétérinaire	104
6.1.1.	Les problématiques discutées.....	104
6.1.2.	Le projet Vetfuturs France : Vision du futur de la profession dressée par elle-même et angle mort du pic pétrolier	105
6.2.	Réflexion éthique sur le rôle à jouer de la profession vétérinaire dans l'accompagnement du pic pétrolier.	106
6.2.1.	Une problématique largement systémique	106
6.2.2.	Responsabilité dans la formation des vétérinaires.....	107
6.2.3.	Responsabilité dans l'intégration de la profession au système agro-alimentaire.....	108
6.2.4.	Responsabilité dans la recherche scientifique	109
Conclusion		111
Bibliographie		113

Table des figures

Figure 1– Coupe transversale d'un piège géologique anticlinal simple (Source : Selley et Sonnenberg, 2015).....	15
Figure 2 - Produits pétroliers raffinés à partir d'un baril de brut (Source : D'après J-M. Jancovici, 2019).....	17
Figure 3 - Tendances socio-économiques mondiales de la grande accélération (Source : D'après Steffen et al., 2015).....	19
Figure 4 - Consommation globale d'énergie primaire par source (Source : D'après Ritchie et al., 2020).....	19
Figure 5 - Consommation de produits pétroliers par secteur de 1990 à 2019 (Source : AIE Data and Statistics).....	20
Figure 6 - Parts des carburants dans la consommation d'énergie finale mondiale des transports en 1973 et 2012 (Source : Moriarty et Honnery, 2016).....	22
Figure 7 - Variation dans le temps du PIB, PIB par habitant et de la production de pétrole dans le monde (Source : de Castro et al., 2009).....	22
Figure 8 - Répartition de la consommation d'énergie primaire en France. (Source : Chiffres clés de l'énergie, édition 2021).....	23
Figure 9 - Modèle mathématique d'un cycle de production complet d'une ressource épuisable (Source : D'après King Hubbert, 1956).....	24
Figure 10 - Modèle de King Hubbert appliqué à une région (Source : D'après Campbell et Laherrère, 1998).....	24
Figure 12 - Courbes de production de champs de pétrole individuels. (Source : D'après Introduction to Peak Oil, Bentley, 2016).....	25
Figure 11 - Production de pétrole brut de l'Ohio, 1880-1956 (Source : King Hubbert, 1956).....	25
Figure 13 - Production de pétrole offshore par champs de 1975 à 2010 au Royaume-Uni (Source : Sorrell et al., 2010).....	26
Figure 14 - Estimations de la date du pic pétrolier du brut par différentes études (Source : D'après Wells et al. (GAO), 2007).....	27
Figure 15 - Production de pétrole mondiale par niveau de maturité des sources et projections jusqu'en 2030 (Source : The Shift Project, 2020).....	29
Figure 16 - Evolution des découvertes et de la production de pétrole conventionnel. (Source : Sorrel et al., 2010).....	30
Figure 17 - Comparaison entre les découvertes de pétrole conventionnel et les investissements dans l'exploration et la production du pétrole et du gaz au cours du temps (Source : D'après The Shift Project, 2020).....	30
Figure 18 - Production mondiale de carburants fossiles liquides par type et projection jusqu'en 2030 (Source : The Shift Project, 2020).....	32
Figure 19 - Production de carburants liquides à partir du pétrole de schiste et de gaz non-conventionnel (Source : The Shift Project, 2020).....	33
Figure 20 - Evolution des projections de l'AIE sur la production du pétrole brut conventionnel au cours du temps (Source : The Shift Project, 2020).....	34
Figure 21 - Différents scénarios de production de pétrole à l'échelle mondiale (Source : Norouzi et al., 2020).....	35

Figure 22 - Production mondiale de carburants liquides par date d'entrée en production des puits et projection jusqu'en 2100 par Rystad Energy (Source : The Shift Project, 2020)	35
Figure 23 - Approvisionnement relatif en pétrole de l'UE par pays en 2018 (Source : D'après The Shift Project, 2020)	37
Figure 24 - Evolution de l'approvisionnement de l'UE par scénario de 2019 à 2030 (Source : The Shift Project, 2020)	38
Figure 25 - Production de pétrole des 16 pays fournisseurs de l'UE et projections jusqu'en 2050 (Source : The Shift Project, 2021)	39
Figure 26 - Importations de gaz naturel en Union Européenne et projections (Source : D'après World Energy Outlook, AIE 2018)	41
Figure 27 - Evolution du prix d'une pile au lithium depuis 1990 et projections jusqu'en 2030 (Source : Ziegler et Trancik, 2021)	54
Figure 28 - Comparaison de la demande en cobalt par usage avec l'approvisionnement de cobalt par source de production en 2030 (Source : Fu et al., 2020)	55
Figure 29 - Emissions de CO2 par kWh produit des pays européens en 2021 (Source : D'après statistica.com, consulté le 21/07/2022)	58
Figure 30 - Projection du nombre de véhicules électriques et hybrides jusqu'en 2035 en France (Source : D'après RTE, 2017)	59
Figure 31 - Répartition spatiale du niveau d'accessibilité de l'offre vétérinaire à destination des animaux de rente en 2014 en France (Source : D'après Gouttenoire et al., 2015)	63
Figure 32 - Part de la consommation de plastique d'un hôpital européen par produit (Source : D'après Gamba et al., 2021)	65
Figure 33 - Transformation des matières premières de l'industrie pétrochimique en 2017 (Source : The Future of Petrochemicals, AIE 2018)	66
Figure 34 - Inflation des prix de différentes consommations aux Etats-Unis autour de la crise pétrolière de 1973 (Source : D'après Hess et al., 2011)	68
Figure 35 - Représentation des flux d'énergie traversant un système agro-alimentaire (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)	72
Figure 36 - Substitution des sources d'énergie investies dans l'agriculture de 1882 à 2013 en France et efficacité de l'agriculture (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2019)	73
Figure 37 - Flux d'énergie détaillés dans un système agro-alimentaire (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2019)	75
Figure 38 - Corrélation entre les indices des produits alimentaires et le prix du pétrole (Source : D'après Zmami et Ben-Salha, 2019)	77
Figure 39 - Gain d'efficacité énergétique de la fixation de l'azote au XXe siècle (Source : D'après Kongshaug, 1998)	78
Figure 40 - Evolution de la production cubaine de certains produits agricoles entre 1989 et 1999 (Source : Wright, 2008)	83
Figure 41 - Energie contenue dans les résidus de culture et fumier en France et estimations de l'énergie récupérable exploitable (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)	89
Figure 42 - Surplus agricole et apport d'énergie issue de la biomasse nécessaire par scénario comparés au modèle actuel (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)	89
Figure 43 - Composition et évolution des rations de différentes productions animales en France (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2017)	92

Table des tableaux

Tableau 1 - Parts des carburants dans la consommation d'énergie finale mondiale des transports en 1973 et 2012 (Source : Moriarty et Honnery, 2016)	21
Tableau 2 - Energie finale consommée dans l'agriculture en France en 2013 (Source : D'après Harchaoui et Chatzimpiros, 2018).....	74

Liste des abréviations

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFVAC : Association Française des Vétérinaires pour Animaux de Compagnie
AIE : Agence Internationale de l'Énergie
ASV : Auxiliaire spécialisé vétérinaire
AVEF : Association Vétérinaire Equine Française
CAPEX : Capital Expense
CNOV : Conseil National de l'Ordre des Vétérinaires
CNRTL : Centre national des ressources textuelles et linguistiques
COP : Conference of the parties
ECE : Efficacité de conversion énergétique
EROI : Energy Return on Investment
FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEVEC : Fédération des Eleveurs et Vétérinaires en Conventionnement
FSVF : Fédération des Syndicats Vétérinaires Français
GAO : Government Accountability Office
GbbI/MbbI : Giga barils/Méga barils
GNL : Gaz naturel liquéfié
GVC : Groupe Vétérinaire Conventionné
HCWH : Health Care Without Harm
HVCs : High Value Chemicals
OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques
ONG : Organisation non gouvernementale
OPEP : Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
PIB : Produit intérieur brut
RTE : Réseau de transport d'électricité
SNGTV : Société Nationale des Groupements Techniques Vétérinaires
SNVEL : Syndicat National des Vétérinaires d'Exercice Libéral
TEB : Tracteur électrique à batterie
TPC : Tracteur à pile combustible
TRE : Taux de retour énergétique
UE : Union Européenne
URSS : Union des Républiques Socialistes Soviétiques
VEB : Véhicule électrique à batterie
VPC : Véhicule à pile combustible

Introduction

Au cours du dernier siècle, le niveau de complexité et d'interrelation de nos sociétés s'est développé de manière exponentielle, à un rythme jamais observé dans l'histoire de l'humanité. Le progrès technique et humain acquis, quoiqu'inégalement réparti, est indéniable. Cependant, l'intensification des productions matérielles et la croissance démographique pèsent désormais sur les ressources et l'équilibre climatique de la planète. Les limites de celle-ci deviennent de plus en plus évidentes. Dès 1972, la publication du Rapport du Club de Rome « The Limits to Growth », l'un des travaux fondateurs de la recherche sur les questions écologiques, alertait sur l'impossibilité de soutenir indéfiniment une croissance économique dans un monde fini : les conséquences climatiques et environnementales ainsi que les ressources limitées de la planète rendraient un tel modèle de production ultimement insoutenable.

La question du dérèglement climatique s'est finalement imposée comme un enjeu majeur pour le futur de nos sociétés dans les champs médiatiques et scientifiques. Cependant, si les conséquences environnementales et climatiques de l'utilisation des énergies fossiles sont au cœur des débats sur l'écologie, la forte dépendance de notre société à celles-ci et sa vulnérabilité à une contraction dans la disponibilité de ces ressources est moins mise en avant. Parmi elles, la raréfaction du pétrole mérite d'être rigoureusement discutée. Des événements récents, de la guerre en Ukraine aux pénuries de carburant résultantes des grèves au sein des raffineries françaises, soulignent la gravité des conséquences d'une disruption dans la disponibilité en hydrocarbures. Entre approches catastrophistes alertant sur un effondrement de notre civilisation à venir et déni de la raréfaction des ressources, il apparaît nécessaire d'analyser les problématiques énergétiques sérieusement et de les intégrer aux réflexions internes à chaque secteur de l'économie et donc, dans notre cas, à celles du milieu vétérinaire.

Cette thèse se propose d'étudier et de présenter pourquoi l'exploitation du pétrole a changé la face du monde au cours du XXe siècle et comment il irrigue notre société. Les activités et la profession vétérinaires sont intégrées à celle-ci et manifestent plusieurs niveaux de dépendances à cette ressource. **Quelles seront alors les conséquences de l'évolution de la disponibilité en pétrole dans notre société sur la profession vétérinaire au cours des prochaines décennies ?**

Les problématiques soulevées dans ce document et les ébauches de solutions avancées ne sauraient être exhaustives. L'objectif de ce travail, par une approche transversale, est de dresser un schéma global de la problématique de la raréfaction du pétrole. En soulevant les dépendances des activités vétérinaires à cette ressource, il espère rendre la réflexion au sein de la profession perméable à cet enjeu et que de nouveaux travaux plus ciblés viennent préciser les contours des problématiques présentées et des adaptations envisageables.

Dans un premier temps sera présenté l'évolution de la place du pétrole dans notre société, de son rôle fondamental dans son essor récent aux projections quant à son déclin futur. Dans un second temps, les dépendances directes et indirectes de la profession vétérinaire à cette ressource seront mises en évidence et les conséquences probables d'une contraction de la disponibilité en pétrole sur les activités vétérinaires seront évaluées à différentes échelles de temps. Des possibilités d'adaptation seront également décrites.

Partie 1 : Evolutions de la place du pétrole dans notre société

1. Une ressource essentielle

1.1. Nature et exploitation du pétrole

1.1.1. Géologie du pétrole

Le pétrole se définit comme une huile minérale, d'origine naturelle dont la composition est un mélange d'hydrocarbures se mêlant à des impuretés(1–3). L'état liquide du pétrole à pression et température ambiante le distingue du gaz naturel, mélange d'hydrocarbures légers sous forme gazeuse à température et pression ambiante. Les hydrocarbures sont des composés organiques formés d'une chaîne carbonée de longueur variable de formule brute C_nH_m dont la température de fusion et d'ébullition augmente avec la longueur de la chaîne et donc son poids moléculaire(4).

La formation du pétrole se fait à partir de matière organique transformée par des phénomènes géologiques. Les débris d'organismes vivants sédimentent au fond des océans. Sous l'augmentation de pression et de température et par l'action de bactéries, la fraction organique de cette roche sédimentaire se transforme en une substance solide intermédiaire appelée kérogène. Les boues sédimentaires sont enfouies sous l'effet de la tectonique des plaques et se compactent en une roche mère, imprégnée de kérogène. Sous l'augmentation de la pression et de la température, le kérogène expulse son eau et son CO_2 puis se produit la pyrolyse de la matière organique en hydrocarbures de différentes longueurs. On observe alors une phase gazeuse correspondant au gaz naturel, une phase liquide correspondant au pétrole et un résidu solide(5).

Lorsque la roche mère est suffisamment poreuse, les hydrocarbures opèrent une migration primaire vers la surface en raison de leur plus faible densité et s'échappent de la roche mère qu'ils imprégnaient. Une migration secondaire les entraîne à travers les autres couches géologiques jusqu'à la surface où ces hydrocarbures seront dégradés sans possibilité de s'accumuler. Il peut arriver que le pétrole et le gaz se retrouvent piégés sous une couche géologique étanche de configuration favorable et s'accumulent dans ce réservoir. Ce sont ces pièges géologiques (Figure 1) qui forment la majeure partie des gisements de pétrole en exploitation(6).

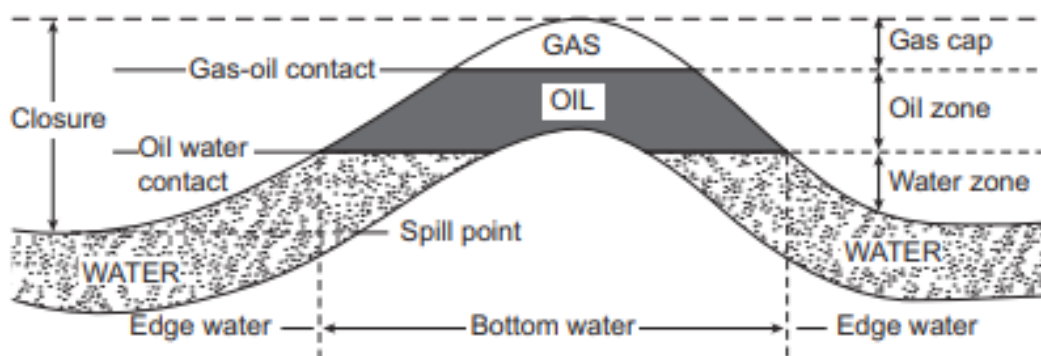


Figure 1– Coupe transversale d'un piège géologique anticlinal simple (Source : Selley et Sonnenberg, 2015)

L'échelle de temps de ce processus, s'étendant que quelques dizaines à quelques centaines de millions d'années ainsi que le concours de circonstances géologiques nécessaire permettant la formation du pétrole expliquent qu'il s'agisse d'une ressource rare, disparates à l'échelle du monde et non renouvelable à l'échelle de temps des sociétés humaines.

1.1.2. Les différents types de pétrole

1.1.2.1. Définition du pétrole brut conventionnel

Il existe une classification entre les différents types de pétroles, dont la nomenclature peut entraîner des confusions notamment en raison des traductions entre la terminologie française et anglaise. La première distinction se fait entre le pétrole conventionnel et non conventionnel(7, 8). Il s'agit d'une discrimination technique : est appelé pétrole conventionnel tout pétrole extrait en utilisant les techniques traditionnelles d'extraction du puits pétrolier. Le pétrole retiré, liquide dans son réservoir et liquide aux conditions de pression et de température à la surface est appelé pétrole brut. Les pétroles extraits peuvent être différents d'un champ à l'autre dans leur composition mais seront homogènes dans leur facilité d'extraction.

Les limites de ce qui peut être qualifié de pétrole conventionnel varient selon les époques et l'évolution des techniques mais peut être considéré comme conventionnel tout pétrole ayant subi un cycle de formation complet tel que décrit précédemment et se retrouvant dans une roche réservoir facilement accessible. Le gisement doit se trouver à moins de 500 m de profondeur et avec moins de 500 m d'eau en surface, dans le cas d'un champ offshore. Le calcul de la densité API du pétrole permet d'évaluer sa facilité d'extraction et un pétrole avec une densité API comprise entre 10° et 45° était autrefois considéré comme conventionnel(9). Si c'est un facteur d'importance pour la facilité d'extraction, c'est dorénavant cette dernière prise dans son ensemble qui discrimine un pétrole conventionnel d'un non conventionnel.

1.1.2.2. Les pétroles non conventionnels

Des conditions géologiques particulières ayant conduit à la formation de pétrole peuvent entraîner des difficultés techniques supplémentaires à l'exploitation de certains gisements. Ces difficultés peuvent être causées par les conditions environnementales de surface du gisement (exploitation en région polaire), par les caractéristiques de la roche mère ou par la composition finale en hydrocarbures lourds ou légers du pétrole. Des techniques d'appoint, souvent plus coûteuses et avec un moins bon rendement énergétique sont alors nécessaires. Les pétroles exploités de cette manière sont dits « non conventionnels »(8, 10). Parmi les pétroles non conventionnels d'intérêt peuvent être cités(11) :

Les schistes bitumineux (oil shale) : Il s'agit d'un pétrole d'origine récente qui n'a pas suivi le cycle complet de sa formation. La pyrolyse est incomplète et doit être achevée par un processus industriel pour obtenir de l'huile de schiste, ce qui réduit drastiquement le rendement énergétique de l'opération.

Les sables bitumineux ou pétroles extra-lourds : Il s'agit d'un pétrole qui a perdu ses éléments volatils, par exemple en imprégnant des sables situés juste sous la surface. Le pétrole exploitable restant est extrêmement visqueux, voire solide. L'extraction en est plus coûteuse et le produit retiré doit être transformé avant de pouvoir être transporté et raffiné(12).

Le pétrole de schiste (shale oil) : Ce pétrole ne peut pas migrer hors de sa roche mère car celle-ci est étanche. Sa récupération nécessite des techniques de fracturation de la roche.

L'offshore profond : Même si le réservoir de pétrole est classique, s'il est situé à une profondeur supérieure à 500m d'eau sous la plateforme pétrolière le gisement est considéré non conventionnel en raison des difficultés techniques d'exploitation.

1.1.3. Raffinage et produits pétroliers

Le pétrole n'est pas directement utilisable une fois extrait. Il est acheminé vers des raffineries où les hydrocarbures qui le composent sont traités et séparés par distillation en fonction de

la longueur de leur chaîne carbonée(13). Sont produits à partir d'un baril de pétrole brut divers produits pétroliers de poids et d'usages différents tels que représentés sur la figure 2. Comme la qualité et la composition d'un baril de brut varie selon son origine, la part des produits obtenus peut varier.

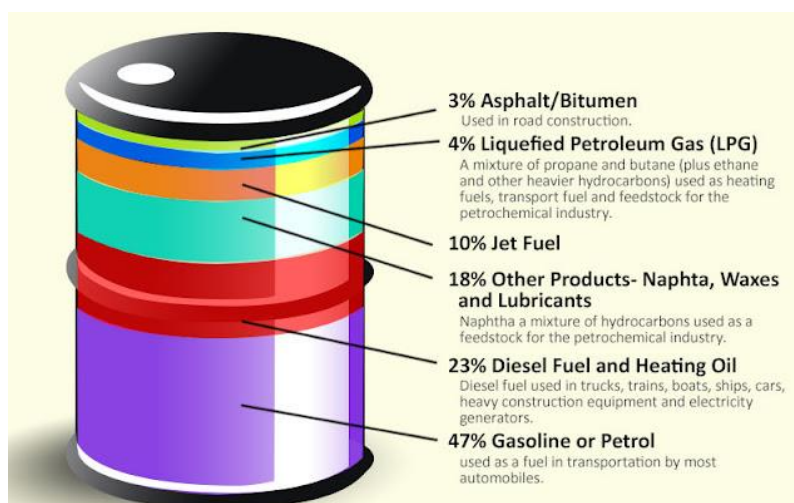


Figure 2 - Produits pétroliers raffinés à partir d'un baril de brut
(Source : D'après J-M. Jancovici, 2019)

Certains de ces produits ont un usage énergétique (essences, diesel) et sont brûlés afin de produire de l'énergie. D'autres ont un usage non énergétique et interviennent comme matière première comme le naphta, précurseur de la pétrochimie ou les bitumes utilisés dans la construction de routes(2).

1.2. Intérêt du pétrole

1.2.1. Notion d'énergie

Il convient d'explicitier la notion d'énergie car celle-ci est étroitement liée à l'usage et l'intérêt que présente le pétrole en tant que ressource pour notre société. Le centre national des ressources textuelles et linguistiques (CNRTL) définit l'énergie au sens physique comme la « capacité d'un corps ou d'un système à produire du travail mécanique ou son équivalent »(14). C'est une grandeur physique exprimée en joules qui permet de quantifier la transformation d'un système. Ceci implique que tout changement d'état d'un système nécessite un transfert d'énergie ou une conversion d'un type d'énergie à une autre via un convertisseur. L'organisme humain convertit de la biomasse en énergie mécanique et un moteur convertit un carburant en énergie mécanique. Cette conversion s'accompagne de pertes, généralement sous forme de chaleur, selon le principe de l'entropie(15). Aucune transformation du réel ne peut s'envisager sans apport d'une source d'énergie.

A l'échelle mondiale, un être humain utilise en moyenne dans son quotidien, par le biais de diverses machines, 200 fois plus d'énergie que ce que son organisme est raisonnablement capable de produire comme travail mécanique. Ce chiffre monte à 400 à l'échelle d'un pays développé comme la France(16). Ces calculs ont été réalisés par l'ingénieur J-M Jancovici qui développe le concept d'esclave énergétique mais n'ont pas été publiés dans des revues à comité de lecture. Ces chiffres sont donc à prendre comme indicateurs de l'ordre de grandeur de l'énergie consommée par une société humaine. Ainsi l'homme fait appel à un important parc de machines consommant diverses sources d'énergie externes déjà existantes afin de permettre tous les flux physiques nécessaires aux diverses activités et productions de l'économie(17).

1.2.2. La forte densité énergétique du pétrole

La densité énergétique se définit comme l'énergie incrustée dans un système donné par unité de volume ou de masse. L'énergie incrustée dans les hydrocarbures du pétrole peut se libérer par simple combustion. La densité énergétique du pétrole est d'environ 45 MJ/kg, soit presque deux fois plus que le charbon (environ 25 MJ/kg) et trois fois plus que le bois sec (environ 15 MJ/kg)(3). La densité énergétique massique du gaz naturel est légèrement supérieure à celle du pétrole (environ 54 MJ/kg(18)) mais la densité énergétique ramenée au volume de ce dernier est trois fois supérieure à celle du gaz naturel comprimé(19). L'uranium et l'hydrogène sont parmi les deux seules sources d'énergie d'intérêt largement plus dense en énergie que le pétrole et nécessitent chacune un mode de conversion plus complexe que la combustion.

1.2.3. L'état liquide du pétrole

L'état liquide du pétrole lui donne un avantage certain par rapport à d'autres sources d'énergie ou ressources. Son extraction en est grandement facilitée. Il suffisait de récolter le pétrole sous pression qui jaillissait une fois le réservoir percé dans les premiers champs en exploitation aux Etats-Unis. Dans la majorité des cas le pétrole peut être récupéré par un simple système de pompage là où l'exploitation du charbon nécessite la construction de mines et beaucoup de machinerie et de main-d'œuvre(20).

Cet état liquide lui permet également d'être facilement transvasé de réservoir en réservoir ou transporté via des oléoducs, par gravité ou à l'aide de pompes. Ce travail est favorisé par sa stabilité aux conditions ambiantes qui rend sa manipulation peu dangereuse, si l'on met à part son caractère inflammable. A titre de comparaison, le gaz naturel doit être transporté sous pression, à travers des infrastructures fixes déjà existantes.

Ces caractéristiques offrent au pétrole un taux de retour énergétique (TRE : le ratio entre l'énergie récupérée d'une source d'énergie sur l'énergie dépensée pour la récupération de cette source) entre son extraction et son utilisation finale très avantageux. Tendanciellement, peu d'énergie est investie dans son extraction et son acheminement au lieu d'utilisation comparativement à d'autres énergies(21, 22).

1.3. Importance du pétrole dans l'essor des activités humaines

1.3.1. Utilisation pré-industrielle du pétrole

Le pétrole est utilisé par les sociétés humaines depuis l'antiquité. Récolté dans des lieux d'affleurements, le bitume était utilisé pour l'étanchéité de la coque des bateaux, de réseaux de tuyauterie ou dans la construction. Il a également servi de combustible, pour l'éclairage ou pour un usage militaire. Toutes ces utilisations sont cependant restées très marginales et son extraction minime jusqu'à l'époque industrielle(20).

1.3.2. Corrélation entre la « grande accélération » et la massification de la production de pétrole.

La révolution industrielle du 19^e siècle marque le début d'un accroissement des productions et des flux des activités humaines ainsi qu'une augmentation de la population mondiale. La ressource énergétique de choix était alors le charbon, le pétrole étant principalement utilisé pour l'éclairage public ou comme lubrifiant pour les mécaniques des machines. On observe cependant une accélération majeure des indicateurs socio-économiques (population, PIB, consommation d'énergie primaire, transports) à partir des années 50(23) (Figure 3), marquant un point d'inflexion visible sur les courbes correspondantes. Ce phénomène est appelé la

« grande accélération » et marque une rupture quantitative avec la période industrielle précédente, elle-même en rupture avec la période pré-industrielle.

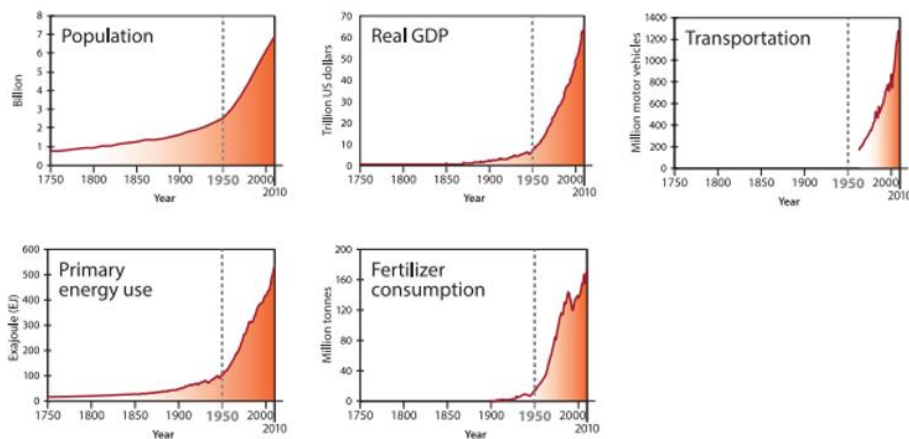


Figure 3 - Tendances socio-économiques mondiales de la grande accélération (Source : D'après Steffen et al., 2015)

Comme vu précédemment, une telle augmentation des flux physiques s'accompagne d'une augmentation proportionnelle d'utilisation d'énergie primaire. On observe une étroite corrélation entre cette accélération et l'essor de la production de pétrole et gaz naturel comme visualisable sur la figure 4(24). On y observe par ailleurs que la biomasse (combustion du bois principalement) est la seule source d'énergie dont l'usage a diminué au cours des derniers siècles, les nouvelles sources d'énergie s'empilant au lieu de se substituer. L'exploitation du pétrole semble être un facteur, sinon causal, au moins nécessaire à l'intensification des productions humaines de la grande accélération. L'usage du pétrole et dans une moindre mesure du gaz naturel ne peut être envisagé comme la cause unique de la grande accélération. En effet, les propriétés de la ressource étaient déjà connues et de nombreux facteurs économiques et politiques interviennent dans l'évolution de la production mais un tel accroissement de celle-ci n'aurait pas été possible sans la découverte de techniques d'exploitation efficaces du pétrole et la massification de son usage.

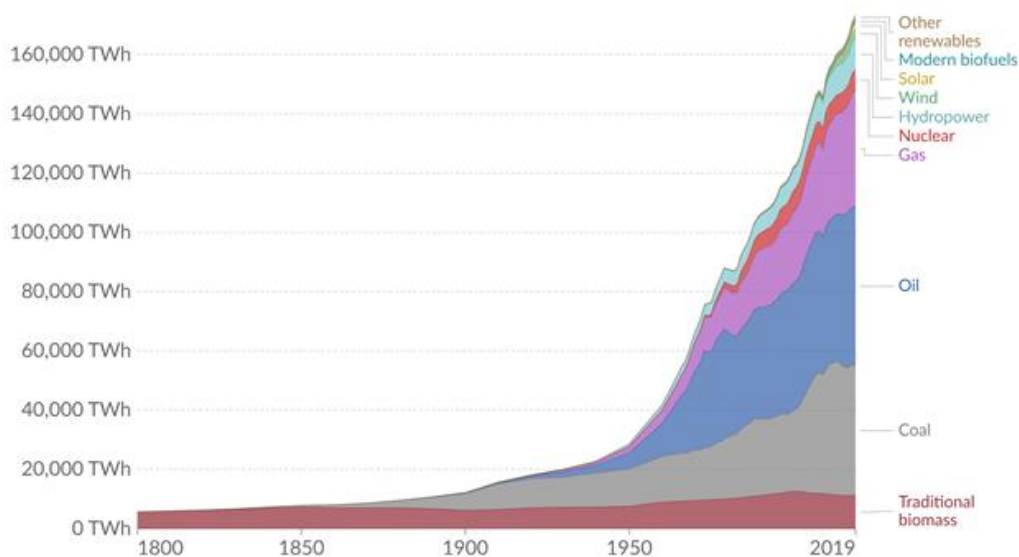


Figure 4 - Consommation globale d'énergie primaire par source (Source : D'après Ritchie et al., 2020)

Il est nécessaire, afin de bien comprendre les enjeux relatifs à l’approvisionnement en pétrole de notre société, de prendre la mesure du changement quantitatif du développement depuis les années 50. Du début de la révolution industrielle lors du XVIIIe siècle aux années 50, les facteurs socio-économiques présentaient déjà une importante augmentation de leur croissance par rapport aux millénaires précédents, où le progrès était lent et peu perceptible. Cette augmentation est cependant sans commune mesure avec celle de la grande accélération et 1950 marque un point d’inflexion visible sur les courbes des tendances socio-économiques de la figure 4. En 60 ans, l’échelle d’une vie humaine, de 1950 à 2010, la consommation d’énergie primaire a été multipliée par cinq, passant de 100 à 500 Exajoules environ. La population a été multipliée par trois et le PIB mondial a été multiplié par plus de six.

1.3.3. Source d’énergie abondante et bon marché

Le caractère abondant et bon marché de cette source d’énergie est l’un des facteurs d’importance donnant au pétrole un rôle fondamental dans la grande accélération. En effet, comme vu précédemment le pétrole représente une source d’énergie de haute densité, facilement transformable par combustion. Sa facilité d’extraction et l’important taux de découvertes initial(25) en ont fait une énergie abondante. Le gisement de Ghawar, en Arabie saoudite est le plus grand champ découvert, toujours en exploitation depuis 1951. A lui seul, il est estimé contenir plus de 160 Giga barils (Gbbbl) de pétrole(20) là où la consommation mondiale précédant la pandémie de Covid-19 était de 97 Méga barils (Mbbbl) par jour en 2018(26, p. 153-169). A l’échelle mondiale, la production n’a cessé de croître durant toute la deuxième moitié du XXe siècle à l’exception des chocs pétroliers de 1973 et 1979(24).

D’un point de vue économique, il s’agit d’une ressource extrêmement bon marché. Malgré sa volatilité, le prix du baril de brut est resté sous la barre des 140 \$ jusqu’en 2008 et était autour de 20 \$ jusqu’au premier choc pétrolier (prix donnés avec correction de l’inflation en dollars américain de 2008)(27). Ainsi, à son coût le plus haut, un litre d’essence consommé dans un moteur à explosion produit approximativement, pour un coût inférieur à 1,8 euros (En France, jusqu’en 2020(28)), autant de travail que 10 jours de travail mécanique humain(16).

1.3.4. Energie des transports : le système sanguin de l’économie

Malgré les avantages de cette source d’énergie qui pourrait s’appliquer à tous les secteurs, on observe une surreprésentation de l’usage de produits pétroliers dans le secteur des transports qui accapare 60% de leur production (Figure 5), par rapport au poids de ce secteur

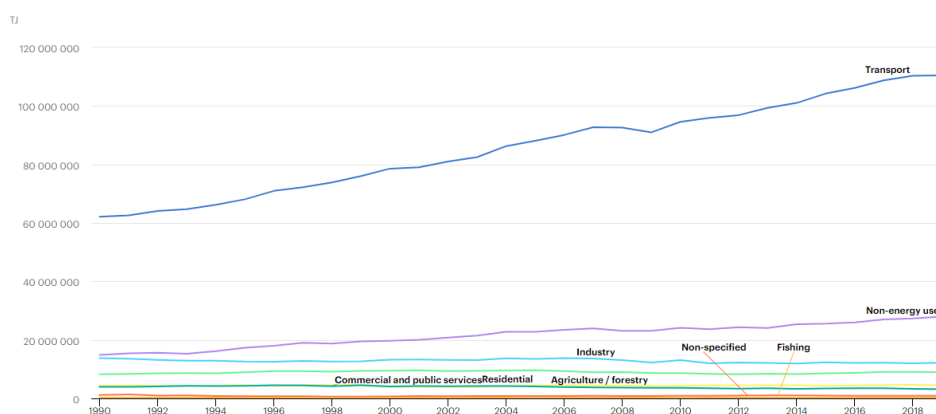


Figure 5 - Consommation de produits pétroliers par secteur de 1990 à 2019
(Source : AIE Data and Statistics)

dans la consommation d'énergie finale globale (29% de l'énergie finale consommée par le secteur des transports)(29).

En effet, le pétrole est une source énergétique de choix pour les transports. Des véhicules légers, qu'il s'agisse de voitures individuelles, de camions routiers ou à une autre échelle d'avions, peuvent transporter leur propre carburant pour un volume restreint. La facilité du transport et du stockage des produits pétroliers permet un réseau de pompes à carburant étendu ce qui offre une grande souplesse pour l'organisation des trajets, individuels ou commerciaux. Le secteur des transports utilise presque exclusivement les produits pétroliers comme carburant(30), à 92,86% en 2012, en perte de moins de deux points seulement depuis 1973 (Tableau 1)(31). Le pétrole peut être qualifié d'énergie des transports, car il remplit ce rôle mieux qu'aucune autre source d'énergie(19).

Fuel	1973 (%)	2012 (%)
Oil	94.30	92.86
Coal	3.05	0.13
Gas	1.64	3.60
Electricity	0.98	1.02
Biofuels	0.03	2.39
<i>Total</i>	<i>100.00</i>	<i>100.00</i>

Tableau 1 - Parts des carburants dans la consommation d'énergie finale mondiale des transports en 1973 et 2012 (Source : Moriarty et Honnery, 2016)

Or, l'essor des transports, tant concernant les véhicules que les infrastructures a eu une importance cruciale dans le développement économique récent des sociétés et la mondialisation(32). L'accès à un réseau de transports rapide, souple et bon marché, a permis d'effacer les distances, d'étendre et d'optimiser les chaînes de productions à travers le monde pour un faible coût. Le secteur des transports peut être considéré comme le système sanguin de l'économie car il intervient dans toutes les productions, lors de l'acheminement des matières premières puis des marchandises tout au long de la chaîne de production, des déplacements des travailleurs, de l'acheminement au point de vente, etc. que ce soit à l'échelle globale, régionale ou locale(33). L'efficacité de ce secteur sous-tend l'ensemble des activités économiques des autres secteurs.

1.3.5. Corrélation entre le PIB et la consommation d'énergie

En conséquence du développement précédent, il est cohérent que les indicateurs de prospérité économique soient corrélés à la consommation de pétrole et plus largement d'énergie. On observe en effet une étroite corrélation entre la consommation finale d'énergie et le PIB par habitant dans de nombreuses études et à différentes échelles spatiales(34, 35). La corrélation entre le PIB mondial et la consommation d'énergie est représentée à la figure 6.

De plus, lorsque les théories économiques néoclassiques dites « orthodoxes » tendent à ne considérer l'énergie que comme un facteur secondaire à la réussite économique par rapport au capital et au travail(17), de nombreuses études démontrent, au-delà de la corrélation, une causalité entre la consommation d'énergie et la croissance du PIB(35–37). Plus de l'énergie est consommée, plus le monde est transformé et plus nombreuses sont les productions matérielles de l'économie, alors que l'accroissement des productions de l'économie sans accroissement de la dépense énergétique n'est pas envisageable. La causalité est cependant

bidirectionnelle, la croissance économique favorisant à son tour l'exploitation des sources d'énergie dans un cercle à priori vertueux.

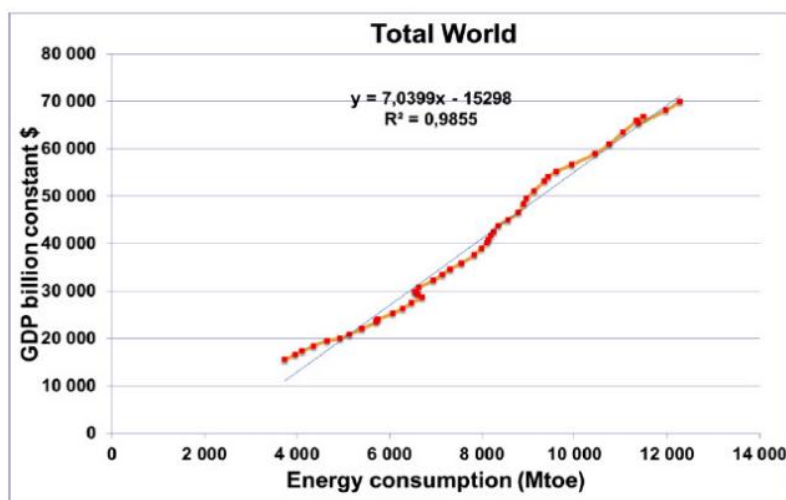


Figure 6 - Parts des carburants dans la consommation d'énergie finale mondiale des transports en 1973 et 2012 (Source : Moriarty et Honnery, 2016)

A fortiori, le pétrole qui représentait 31,6% de l'énergie finale consommée dans le monde en 2018 selon l'AIE(26) devrait compter pour au moins cette part dans le rôle de la consommation énergétique favorisant la croissance économique(38). Son importance est sans doute plus grande encore en raison du rôle majeur du secteur des transports décrit précédemment pour lequel il est la ressource quasi exclusive. Corroborant cette hypothèse, on observe en effet une forte corrélation entre la consommation de pétrole et le PIB(39) (Figure 7). Il est à noter que cette corrélation disparaît si l'on compare au PIB le prix du pétrole au lieu de sa consommation, ce qui illustre l'intérêt d'analyser les flux physiques réels plutôt que la traduction de leur valeur par le marché, un indicateur comme le prix pouvant se révéler très volatil.

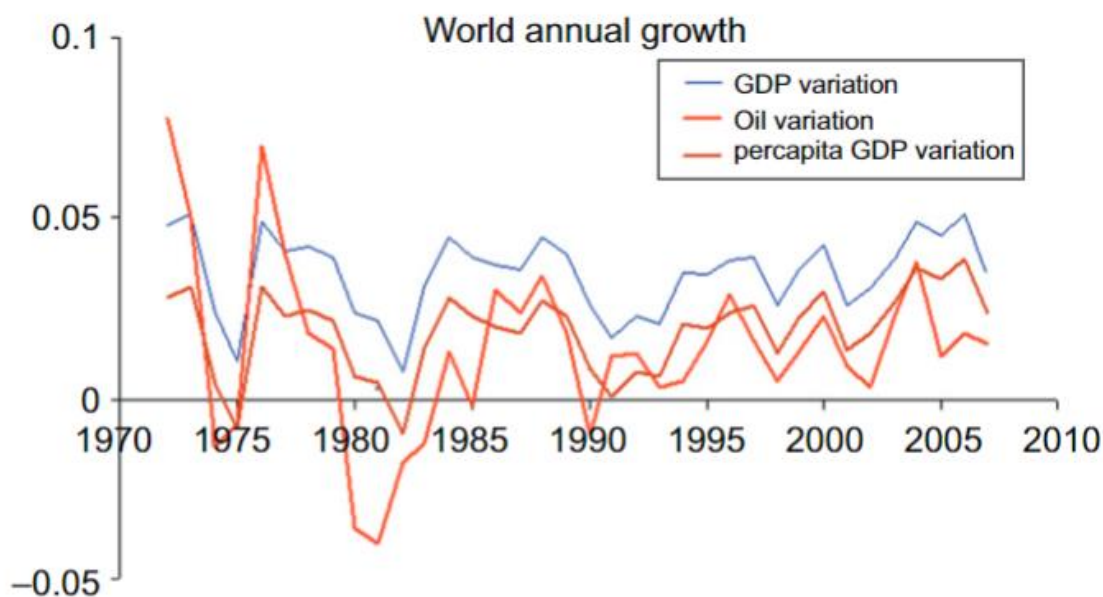


Figure 7 - Variation dans le temps du PIB, PIB par habitant et de la production de pétrole dans le monde (Source : de Castro et al., 2009)

1.3.6. Part dans le mix énergétique global

Les produits pétroliers comptent pour 31,6% de l'énergie finale consommée au niveau mondial en 2018(29). Ce taux est en baisse par rapport à 1973 où il était de 46,2% notamment en raison du développement du nucléaire et surtout de l'augmentation de la part du charbon. Si sa part a baissé, la consommation absolue de pétrole a cependant augmenté avec l'ensemble de la consommation d'énergie.

A l'échelle de la France, les produits pétroliers comptent pour 28,1% de l'énergie finale consommée(40) (Figure 8). Malgré la surreprésentation du nucléaire en France par rapport au monde qui remplace presque intégralement le charbon pour la production d'électricité, on observe que le pétrole reste une énergie majeure de la consommation française qui n'est pas remplacée par l'énergie nucléaire.

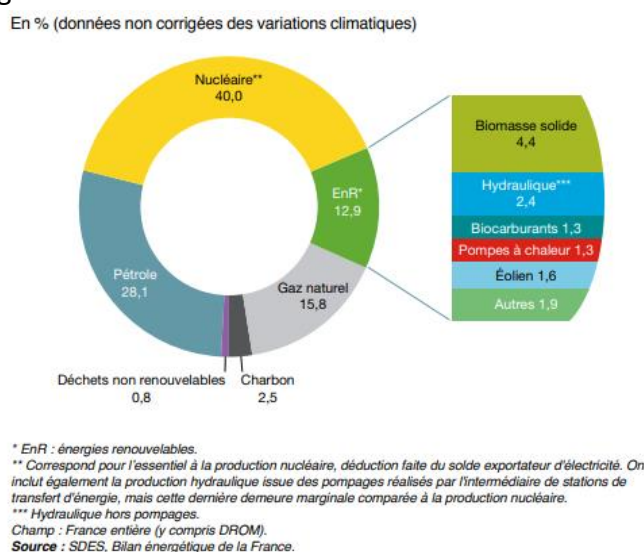


Figure 8 - Répartition de la consommation d'énergie primaire en France.
(Source : Chiffres clés de l'énergie, édition 2021)

2. Une ressource finie

2.1. Un stock non renouvelable

Une ressource naturelle est une source de matière et d'énergie accessible dans le milieu naturel sous une forme primaire avant sa transformation par l'homme, selon la définition de l'Insee(41). Le caractère renouvelable de la ressource s'évalue en comparant le taux de renouvellement de la ressource, qui peut être naturel ou optimisé par les activités humaines (lors de la gestion d'une forêt par exemple), à son taux d'extraction ou de transformation. Si le renouvellement de la ressource est plus rapide que son extraction, la ressource peut être qualifiée de renouvelable. Ce caractère dépend ainsi non seulement de la nature de la ressource mais également de l'intensité de son exploitation, paramètre variable dans le temps.

Dans le cas du pétrole, l'échelle de temps du renouvellement de la ressource varie de la dizaine à la centaine de millions d'années selon le type de pétrole(5). Cette échelle est sans commune mesure avec l'échelle de temps ni de l'exploitation intensive du pétrole (une centaine d'années), ni des sociétés humaines (quelques milliers d'années) ni même de l'espèce humaine (quelques centaines de milliers d'années). Dans l'histoire géologique de la planète un certain stock fini de pétrole s'est formé, précédemment à son exploitation, qui ne peut qu'être consommé aux échelles de temps d'intérêt de nos sociétés. Il apparaît alors

pertinent d'évaluer ce stock afin d'anticiper l'évolution de la disponibilité future de la ressource.

2.2. Le concept de pic pétrolier

2.2.1. Modèle de King Hubbert

Dans un article de 1956, le géologue King Hubbert se demande jusqu'à quand la croissance exponentielle des taux d'extraction de pétrole observée au Etats-Unis va pouvoir se maintenir(42). Il opère la démonstration mathématique que pour un stock donné d'une ressource finie, tel qu'un champ de pétrole, l'extraction de la ressource ne peut se comporter autrement qu'aller d'une production nulle à une production nulle en passant par un ou plusieurs maximums. Une version simple d'un tel modèle est représentée par la figure 9. L'aire sous la courbe correspond à la production ultime de la ressource et est égale ou inférieure à la quantité initiale de la ressource. Ce modèle fait depuis référence dans la plupart des articles et des débats concernant les réserves de pétrole restantes(43).

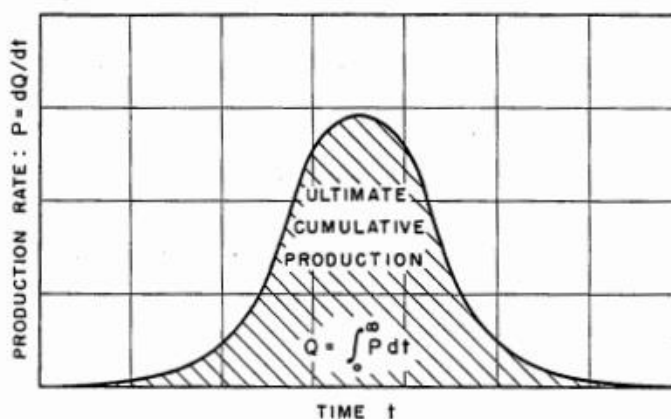


Figure 9 - Modèle mathématique d'un cycle de production complet d'une ressource épuisable (Source : D'après King Hubbert, 1956)

En additionnant les courbes de chaque champ d'une région donnée, une courbe similaire peut être obtenue pour l'ensemble des réserves de la région(44) (Figure 10). La plus grande échelle d'intérêt étant l'échelle mondiale.

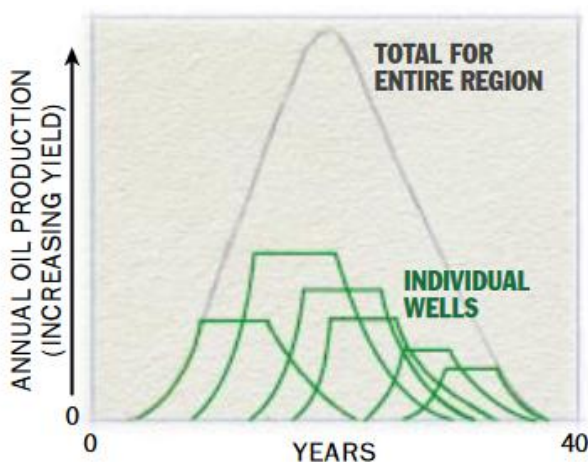


Figure 10 - Modèle de King Hubbert appliqué à une région (Source : D'après Campbell et Laherrère, 1998)

2.2.2. Les différentes phases de la courbe

Trois phases distinctes sont observables sur la courbe du modèle de King Hubbert. Une phase de croissance de la production, d'abord exponentielle. Puis un ralentissement pour atteindre

un maximum, généralement qualifié de « pic », bien que celui-ci puisse prendre la forme d'un plateau. Et enfin une phase de déclin jusqu'à une production nulle(42).

La croissance de la première phase s'explique par la facilité d'extraction des premiers champs. En effet, les champs les plus grands et faciles d'accès sont généralement découverts et exploités en premier. La production est rentable et permet des investissements peu risqués dans la prospection de nouveaux champs ou dans le développement de techniques d'extraction plus efficaces.

A mesure que les anciens champs s'épuisent, et que les champs restant à découvrir sont de plus en plus petits, difficiles d'accès et nécessitant une infrastructure lourde, la croissance de la production ralentit jusqu'à un pic correspondant au débit d'extraction maximum qu'il aura été permis d'atteindre.

Finalement le débit de production décline à mesure que les nouvelles découvertes et la progression des techniques de l'industrie ne compense plus la déplétion des champs en exploitation. La ressource est toujours extraite mais à un rythme de plus en faible(45).

2.2.3. Applicabilité du modèle

Certains champs ou régions d'exploitation ont déjà épuisé ou presque leurs réserves. Les données de leur production en fonction du temps permettent de comparer l'évolution réelle de stocks de pétrole au modèle de King Hubbert. Les courbes de production des champs de pétrole individuels semblent pouvoir varier considérablement en raison des nombreux facteurs locaux influençant leur exploitation(45), sans toutefois déroger à la démonstration mathématique de King Hubbert.

Sur les courbes de production de la figure 11, on observe différents profils, avec une croissance importante puis un déclin abrupt ou alors un pic prenant la forme d'un long plateau. Le même type de courbe s'observe pour la production pétrolière d'une région cumulant plusieurs champs, comme pour la région de l'Ohio visible à la figure 12.

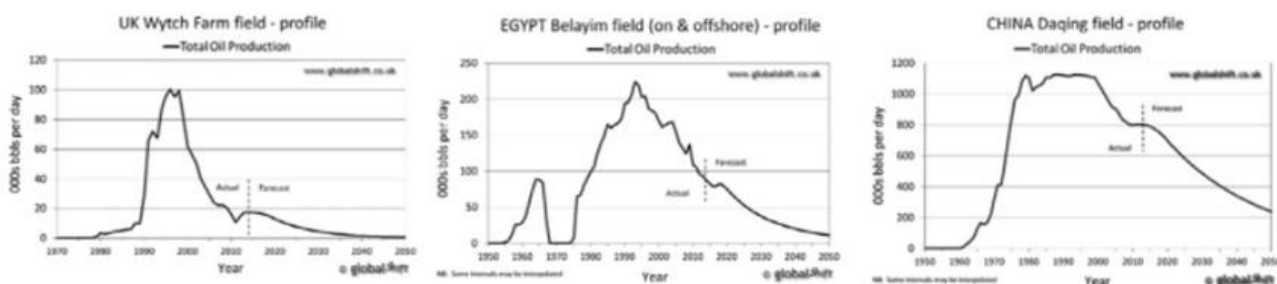


Figure 11 - Courbes de production de champs de pétrole individuels. (Source : D'après Introduction to Peak Oil, Bentley, 2016)

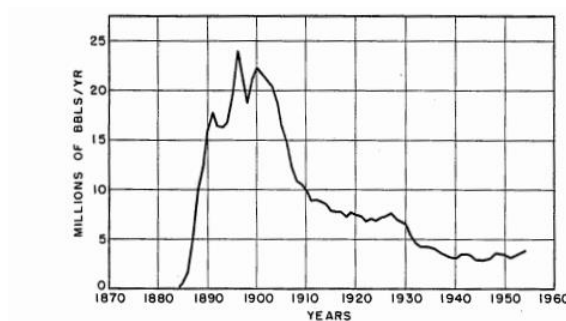


Figure 12 - Ohio production of crude oil.

Figure 12 - Production de pétrole brut de l'Ohio, 1880-1956 (Source : King Hubbert, 1956)

Sur la courbe de production des champs offshore du Royaume-Uni (Figure 13), on observe le même phénomène de déclin avec une forme en « dos de chameau », qui peut apparaître lorsque de nouvelles découvertes importantes ou une amélioration soudaine de la technique permet de temporairement regagner une croissance de la production. Il s'agit d'une limite à la version en courbe en cloche du modèle de King Hubbert qui n'admet qu'un pic, là où plusieurs pics sont parfois observés(25).

Le cas du Royaume-Uni illustre également que la production d'une région provient de l'empilement de production de ses champs, les plus importants étant exploités les premiers, avant que les nouvelles découvertes successives, moins importantes, compensent partiellement le déclin des précédentes(46).

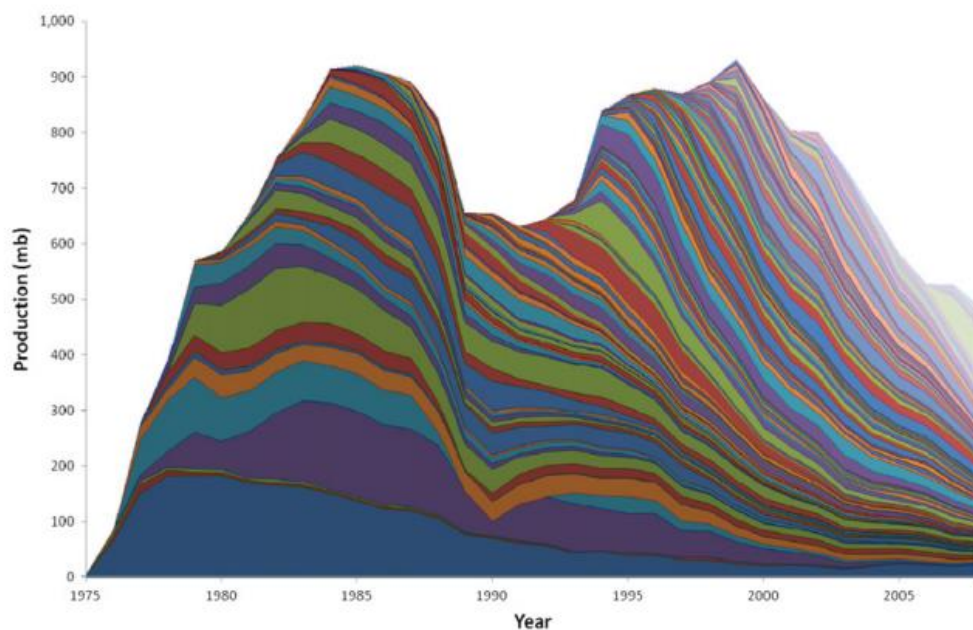


Figure 13 - Production de pétrole offshore par champs de 1975 à 2010 au Royaume-Uni
(Source : Sorrell et al., 2010)

Le modèle de King Hubbert semble ainsi s'appliquer correctement aux données existantes sur les champs ayant amorcé ou fini leur déclin et devrait permettre de présager les futurs profils de production des régions pétrolières en exploitation et en particulier de la production à l'échelle mondiale.

Le point d'intérêt majeur de cette courbe est la date du pic, puisque celle-ci marque une rupture dans le rythme d'approvisionnement qui devient pour la première fois dans l'histoire mondiale de l'exploitation de la ressource tendanciellement décroissant, ce qui a le potentiel de profondément perturber les activités humaines. La problématique dite « du pic pétrolier » mondial, est largement débattue, tant concernant la date de sa survenue que ses impacts sur l'économie et l'organisation sociale des sociétés humaines(43).

2.3. Dater le pic mondial

2.3.1. Controverses historiques entre prévisions « pessimistes » et « optimistes »

Il est possible d'estimer la date du pic de production de pétrole d'une région ainsi que la quantité ultime récupérée. Dès 1956, King Hubbert prédisait avec succès que la production de pétrole brut des Etats-Unis atteindrait son pic en 1970(25, 42) malgré de long débats

contradictoires, notamment avec le directeur de l'institut d'études géologiques des Etats-Unis(43). Il a également estimé la date du pic mondial de pétrole brut aux alentours de l'année 2000.

Depuis, de nombreux auteurs issus de différents domaines mais ayant généralement en commun d'avoir préalablement travaillé dans l'industrie pétrolière ont produit des travaux visant à estimer la date et la forme du pic pétrolier mondial(47). Certaines études peuvent être qualifiées d'alarmistes, prévoyant un pic pétrolier proche dans le temps et alertant sur le caractère imminent de cette problématique, telle que l'étude de Campbell et Laherrère de 1998 prévoyant le pic dans la décennie suivante(44). D'autres se veulent beaucoup plus rassurantes et optimistes quant à la future disponibilité du pétrole, comme celles de Lynch(48) ou de Maugeri(49).

En 2007, un rapport du Government Accountability Office (GAO) des Etats-Unis compile différentes dates du pic pétrolier mondial du brut estimées par de précédentes études(50) (Figure 14).

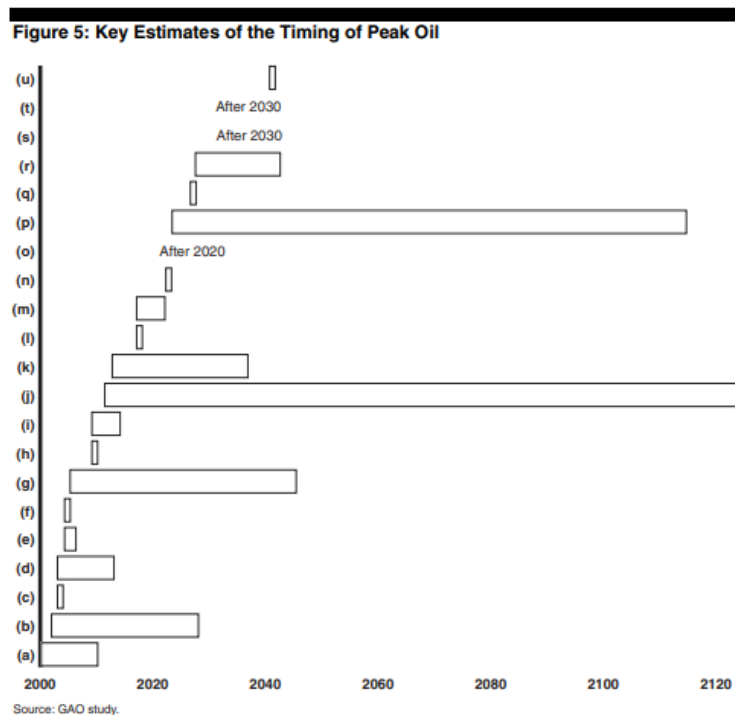


Figure 14 - Estimations de la date du pic pétrolier du brut par différentes études
(Source : D'après Wells et al. (GAO), 2007)

Si 14 études sur les 21 recensées proposent une date du pic avant 2040, on observe une grande disparité des résultats avec deux études admettant une date ultérieure à 2100. Il est à noter que dans ces deux études, le large intervalle donné pour le pic pétrolier est dû à l'incorporation de plusieurs scénarios incluant des variations de taux de découverte et de croissance de la demande. Dans les deux cas, les scénarios de plus haute probabilité donnent un pic avoisinant 2040(47, 51). Malgré la disparité des résultats, on observe un consensus relatif sur une échéance proche du pic pétrolier, vraisemblablement au cours de la première moitié du XXI^e siècle.

La diversité des pronostics résulte de différences méthodologiques mais également de différences idéologiques dans l'approche du problème. Sorrel *et al.* pointent en 2010 que la disparité des projections est due à des différences de modèle, un manque de transparence

sur les hypothèses de départ et les définitions utilisées. Ils argumentent qu'un meilleur consensus sur la date du pic serait atteint avec une meilleure uniformité dans la méthode des études et l'exploration de scénarios multiples(46). Comme il sera exposé plus loin, la date du pic de production du pétrole brut est dorénavant connue, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) recensant que ce pic a été atteint en 2008 pour une production de 69 millions de barils par jour(26). Cependant, comprendre les différences méthodologiques et la difficulté à évaluer la date d'un pic de production paraît pertinent afin de mieux cerner les incertitudes restantes et d'évaluer la date du pic pétrolier, tous pétroles confondus.

2.3.2. Estimation des réserves ultimes récupérables

Estimer les réserves ultimes récupérables d'une ressource comme le pétrole implique de s'intéresser à de nombreux facteurs et gérer de nombreuses incertitudes. De plus, les analystes s'appuient sur des données fournies par les compagnies pétrolières ou les pays exportateurs qui ne sont généralement pas vérifiées par un organisme tiers neutre(52).

Il est tout d'abord nécessaire d'estimer les quantités présentes dans les champs de pétrole déjà découverts. Pour cela, différentes méthodologies existent pouvant amener à des évaluations très différentes. Bentley *et al.*, en 2007, argumentent que la méthode d'estimation des « réserves prouvées » (1P) longtemps utilisée tant par les compagnies que par des agences internationales comme l'AIE conduit à de bien plus mauvaises estimations que la méthode des « réserves prouvées et probables » (2P)(53), conduisant à d'importantes différences de projection pour les productions de différentes régions. La méthode 2P devient cependant la méthode d'analyse majoritaire, bien que non systématique, pour les projections les plus récentes(45). Certains intérêts économiques conduisent également les pays producteurs à surévaluer les réserves des champs découverts afin d'obtenir, au sein de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP), des parts de marché plus importantes, celles-ci étant proportionnelles aux réserves déclarées du pays(45).

Une seconde difficulté vient de l'estimation des futures découvertes. Combien de champs reste-t-il à découvrir, de quel volume, et à quel rythme se produiront ces découvertes. L'estimation des découvertes à venir se fait généralement par extrapolation de la courbe des découvertes passées(25). Les progrès technologiques, les niveaux d'investissement dans la prospection, les réserves réelles restantes sont cependant autant de facteurs susceptibles d'agir sur le niveau de découvertes mais la prévision de chacun de ces facteurs est également incertaine. Ainsi, au-delà des connaissances géologiques techniques permettant de supposer les réserves restantes d'une région, un degré de confiance différent dans l'innovation technologique permettant une meilleure prospection ou exploitation conduira à des prévisions plus ou moins optimistes.

Enfin il est nécessaire de clarifier le type de pétrole auquel l'on s'intéresse. Dans un premier temps, les études se concentraient sur l'évaluation du pic pétrolier du brut conventionnel, celui-ci représentant l'écrasante majorité du pétrole exploité(50). A mesure que des méthodes d'exploitation et de prospection des pétroles non conventionnels se développent, les réserves exploitables de ces derniers doivent être prises en compte pour dater le pic pétrolier mondial tous pétroles confondus. L'inclusion des pétroles non conventionnels a conduit des auteurs à repousser leur prévision initiale du pic pétrolier. Laherrère par exemple a repoussé d'une dizaine d'années la date du pic présentée dans l'article écrit avec Campbell en 1998(44), estimant dans son article de 2003 que le pic de production tous pétroles confondus adviendra au début des années 2020(54).

2.3.3. Prévision de l'évolution de la demande

Prévoir l'épuisement de la ressource nécessite de comparer l'état des réserves à la vitesse à laquelle elles seront consommées. La disponibilité de la ressource peut ainsi être surestimée si les prévisions se font à consommation constante à partir d'une date donnée. Cependant, comme vu précédemment, la consommation de pétrole, en lien avec la croissance économique, augmente perpétuellement depuis sa découverte, à l'exception des périodes suivant les chocs pétroliers de 1973 et 1979. L'estimation de l'évolution future de la demande en pétrole est donc un facteur fondamental dans la prévision du pic pétrolier et l'analyse de scénarios différents peut mener à une grande disparité dans les projections.

2.4. Etat des lieux

2.4.1. Maturité des champs découverts

Un appelle champ mature, un champ dont la production semble avoir passé son pic, et qui a donc déjà donné plus de 50% de ses réserves ultimes récupérables. On appelle taux de déclin naturel, le déclin de sa production si aucun effort d'investissement supplémentaire dans l'extraction n'est entrepris. Un tel effort d'investissement peut permettre de temporairement réduire le déclin, ou d'obtenir un second pic de production mais de manière provisoire et toujours contrainte par les caractéristiques physiques du champ.

Le rapport de l'AIE de 2018 indique que près de la moitié de la production de pétrole dans le monde provient de champs matures, et donc en déclin(26). Ces données correspondent à celles de Rystad Energy, l'une des sociétés indépendantes de recherche et de conseil sur les questions énergétiques de référence, publiées par le groupe de réflexion français The Shift Project dans une étude de 2020 (Figure 15)(55).

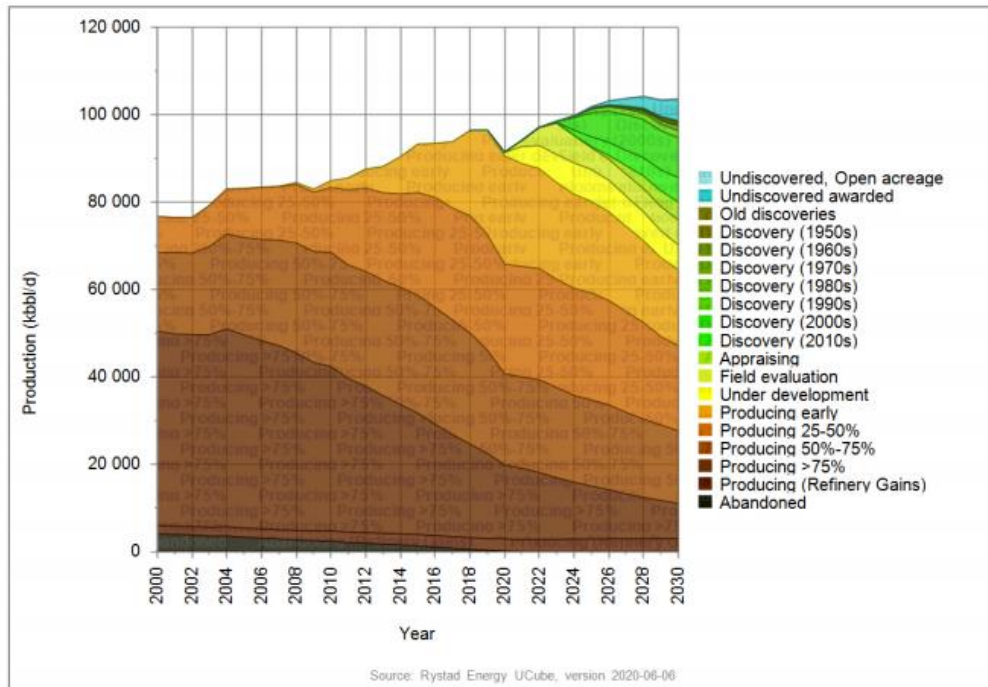


Figure 15 - Production de pétrole mondiale par niveau de maturité des sources et projections jusqu'en 2030 (Source : The Shift Project, 2020)

L'AIE pointe que pour maintenir un niveau de production constant, donc sans inclure de croissance de la demande en pétrole, un tiers des sources de production existantes devront être remplacées d'ici à 2030, soit par la mise en exploitation de champs déjà découverts, ou

par la découverte hypothétique de nouveaux champs, ce qui correspond à une production de 23,6 Mbbl par jour(26). Malgré l'existence de régions dont la production de pétrole est en croissance, on observe que la majorité des sources de pétrole du monde ont un niveau de maturité avancé ou sont en déclin. Pour maintenir un niveau de production constant, et à fortiori un niveau de production croissant, il est nécessaire de perpétuellement remplacer les réserves déclinantes par de nouvelles découvertes, qui sont tendanciellement individuellement moins importantes que les premiers grands champs mis en exploitation. L'industrie pétrolière est donc en course sur le tapis roulant du déclin, lorsque les nouvelles découvertes seront insuffisantes, le pic pétrolier mondial sera atteint.

2.4.2. Décroissance du taux de découvertes

Si le taux de découvertes s'est révélé croissant dans les premières décennies d'exploitation du pétrole, les grands champs faciles d'accès étant les plus susceptibles d'être trouvés rapidement, celui-ci chute depuis les années 60 : tendanciellement, de moins en moins de pétrole est découvert chaque année(44, 46, 55) (Figure 16).

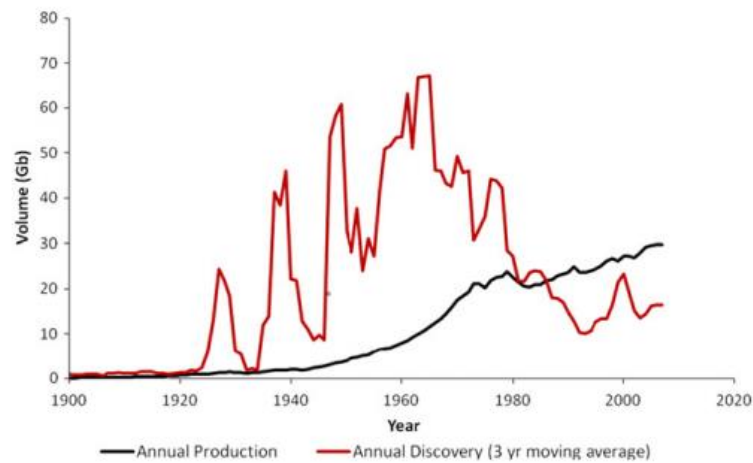


Figure 16 - Evolution des découvertes et de la production de pétrole conventionnel.
(Source : Sorrel et al., 2010)

Cette décroissance se produit malgré des niveaux d'investissement toujours plus importants dans l'exploration, particulièrement élevés dans la dernière décennie (Figure 17 : le montant

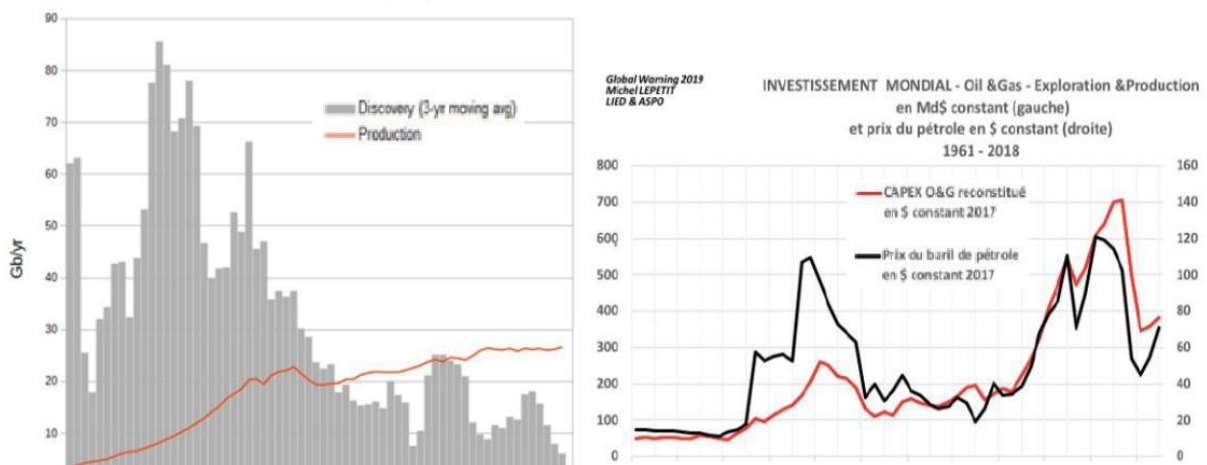


Figure 17 - Comparaison entre les découvertes de pétrole conventionnel et les investissements dans l'exploration et la production du pétrole et du gaz au cours du temps
(Source : D'après The Shift Project, 2020)

CAPEX correspond aux dépenses investies dans la construction de nouvelles infrastructures)(55).

L'estimation des découvertes futures faite en extrapolant cette courbe est peu encourageante sur la capacité des nouvelles découvertes à compenser le déclin des champs existants. Seuls 500 champs de pétrole comptent pour deux tiers des découvertes cumulées, ces champs correspondants aux champs géants découverts précocement et dont la plupart sont en déclin(46). Des sursauts du taux de découvertes sont possibles, par des efforts d'investissement accrus par exemple, mais la tendance générale est au déclin également. Toujours plus d'efforts et d'investissements sont nécessaires pour trouver toujours moins de pétrole.

2.4.3. Croissance de la demande

Malgré la maturité des champs en exploitation et la décroissance des découvertes, il paraît peu probable que la croissance de la consommation de pétrole s'interrompe dans un premier temps. Le système économique mondialisé vise la croissance économique comme principal indicateur de réussite ce qui, comme vu précédemment, implique une augmentation de la consommation de carburant liquide. Une croissance particulièrement importante de la demande en carburants liquides (presque exclusivement constitués de produits pétroliers) est attendue dans certaines régions ou pays émergents comme l'Asie Pacifique et l'Afrique. Une augmentation de la consommation de 8 Mbb/j est attendue d'ici 2030 dans ces deux régions(55). L'augmentation de cette demande est d'autant plus probable que la population mondiale est amenée à augmenter, les estimations moyennes de l'ONU de 2019 évaluant à la population mondiale en 2050 à 9,7 milliards d'individus et en 2100 à 10,8 milliards(56). Toutes choses égales par ailleurs, si la consommation de pétrole par habitant reste constante, la consommation mondiale devrait augmenter avec la population.

A l'échelle globale, dans son rapport de 2021, l'AIE explore 3 scénarios quant à la croissance de la demande de pétrole(57). Le scénario le plus probable, se basant sur les politiques énergétiques actuellement mises en place ou en préparation prévoit une augmentation de 15% de la demande en pétrole d'ici 2030 puis une stabilisation jusqu'en 2050. Un second scénario assumant que tous les engagements climatiques pris lors de la COP 26 soient respectés dans les temps prévoit une augmentation de la consommation d'environ 8% jusqu'en 2030 puis une baisse. Seul le dernier scénario visant un objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre prévoit une baisse de la demande en pétrole d'ici 2030.

Dans l'état actuel des politiques énergétiques, il paraît plus rationnel de s'attendre à une croissance de la demande en pétrole dans les prochaines années. L'intensité de cette croissance, incertaine, détermine le rythme de la course contre le déclin nécessaire pour remplacer les réserves de pétrole matures.

2.4.4. Date du pic du pétrole brut

Si la date du pic du pétrole conventionnel brut a été longuement débattue, les données actuelles ont permis à l'AIE dans son rapport de 2018 de déterminer que ce pic a été franchi en 2008(26) pour une production maximale de 69 Mbb/j. Le pétrole brut, qui correspond à deux-tiers de la production actuelle de pétrole, est donc entré depuis une dizaine d'années dans une phase de plateau puis de déclin de sa production, celle-ci s'étant réduite de 2,5 Mbb/j jusqu'en 2018. Ce sont les estimations les plus basses qui se sont révélées être les plus proches de la date historique du pic du pétrole conventionnel.

Cependant la production tous pétroles confondus est toujours en croissance et ne semble pas avoir atteint son pic. Celui-ci a en effet été repoussé par l'essor récent des pétroles non

conventionnels. L'avenir de la production de ces pétroles sera donc un facteur déterminant pour le pic pétrolier mondial.

2.4.5. Perspectives pour les pétroles non conventionnels

L'essor des pétroles non conventionnels a permis de repousser le pic de production mondiale en compensant le déclin du brut conventionnel. Parmi eux, c'est le pétrole de schiste (*tight oil* ou *shale oil* en anglais) qui représente la plus grosse partie de la production après une croissance importante dans les années 2010 (Figure 18), événement récent le plus marquant de l'industrie pétrolière.

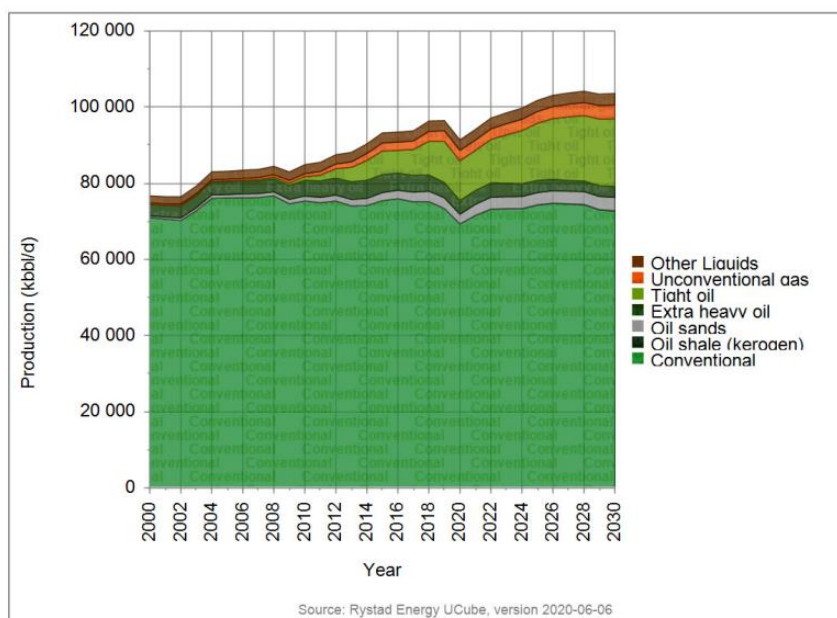


Figure 18 - Production mondiale de carburants fossiles liquides par type et projection jusqu'en 2030 (Source : The Shift Project, 2020)

Maugeri, expert dans une compagnie pétrolière se rangeant du côté des analystes optimistes quant au pic pétrolier mondial(49), analyse en 2013 l'essor du pétrole de schiste aux Etats-Unis(58). Le pétrole de schiste est un pétrole resté prisonnier dans sa roche mère imperméable. Une fois extrait il possède les mêmes caractéristiques qu'un pétrole brut mais ce sont les conditions nécessaires à son extraction qui le classe dans les pétroles non conventionnels. La roche mère étant imprégnée de pétrole sans que celui-ci puisse s'extraire, des puits sont creusés jusqu'à cette roche mère qui est ensuite fracturée par l'injection d'eau sous pression aux alentours du forage. Le pétrole peut alors s'échapper et être capté. Cependant un seul forage ne permet d'exploiter qu'une toute petite zone de la roche mère, et la plupart des puits voient leur production atteindre leur pic en quelques semaines puis décroître de 40 à 50% en moins d'un an. L'exploitation de cette ressource nécessite donc une intensité de forage extrêmement importante, les puits devant être construits à quelques centaines de mètres les uns des autres sur de vastes espaces. Les conditions géologiques des Etats-Unis et ses grands espaces inhabités ont permis un essor extrêmement important et rapide du pétrole de schiste, qui a permis à ce pays de reprendre sa place de premier producteur mondial de pétrole alors que ses réserves de brut déclinent depuis les années 70.

L'AIE estime que pour compenser le déclin du pétrole conventionnel, la production de pétrole de schiste devrait tripler entre 2018 et 2025(26). Cependant, malgré l'essor observé aux Etats-Unis favorisé par une mise en production rapide des puits, Maugeri pointe que l'intensité de forage nécessaire et l'impact environnemental local ne permet pas l'exploitation de la ressource dans des régions plus densément peuplées comme l'Europe(58). Seules la

Russie ou la Chine auraient le potentiel géologique et démographique de manifester un essor significatif pour cette ressource selon lui.

De plus le secteur de l'exploitation du pétrole de schiste aux Etats-Unis a été déficitaire tout au long de son développement malgré les grandes quantités de pétrole produites en raison de l'importance de l'investissement nécessaire pour les nombreux forages. L'industrie n'est redevenue légèrement bénéficiaire en 2019 qu'au prix d'une réduction des investissements et donc du rythme d'extraction. Rystad Energy estime que la production mondiale de pétrole de schiste ne pourra au mieux que doubler d'ici 2030(55).

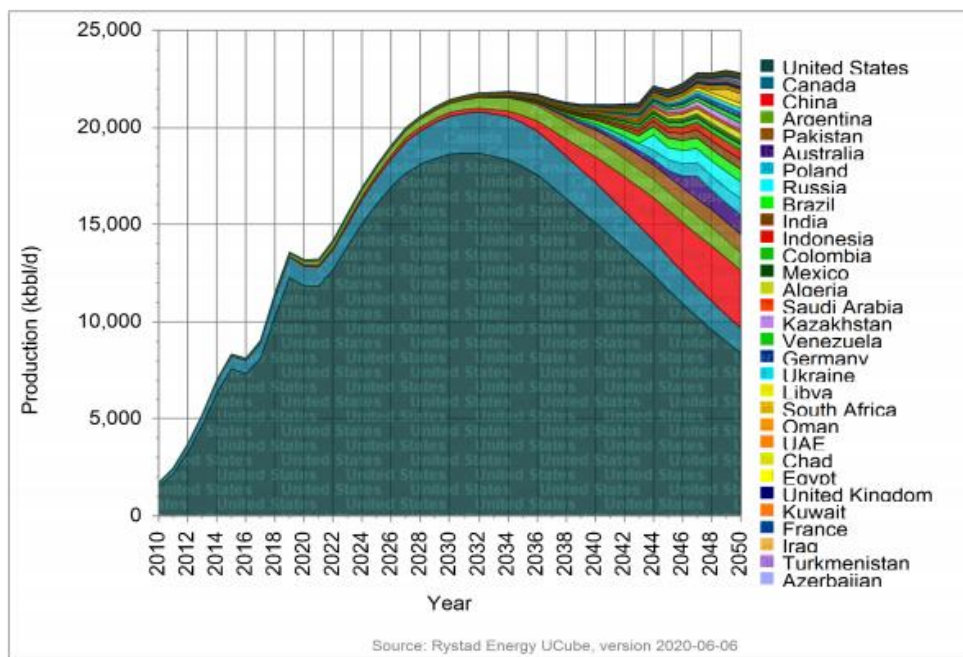


Figure 19 - Production de carburants liquides à partir du pétrole de schiste et de gaz non-conventionnel (Source : The Shift Project, 2020)

Enfin ce type de pétrole n'échappe pas aux mêmes logiques que le pétrole conventionnel et est voué à atteindre son pic de production un jour. Rystad Energy prévoit un rebond de l'essor du pétrole de schiste aux Etats-Unis jusqu'à son pic de production en 2031, le déclin suivant étant partiellement compensé par de plus petits essors probables dans d'autres pays, notamment en Chine (Figure 19). Le pétrole de schiste apparaît comme un substitut efficace mais limité dans le temps permettant de repousser temporairement le pic pétrolier global.

Les projections de Rystad Energy montrent que le pétrole de schiste est le seul responsable de la croissance attendue des pétroles non conventionnels (Figure 18). La perspective de croissance des autres formes de pétrole non conventionnel est faible selon l'AIE et leur production restera probablement constante dans les prochaines décennies(26). Bien que des réserves significatives de pétrole extra-lourd au Venezuela (90% des réserves connues) et de sables bitumineux au Canada existent (deux tiers des réserves connues)(59), la part des investissements dans ces types de pétrole stagne ou se réduisent de 2012 à 2019(60).

De plus, que ce soit pour l'offshore profond, l'exploitation en condition glaciaire ou l'extraction et le raffinage de pétroles visqueux comme celui du Venezuela et du Canada, le taux de retour énergétique est très mauvais et les infrastructures complexes et coûteuses, ce qui décourage les investissements(55). Ainsi la production de ces pétroles non conventionnels devrait être intéressante car constante et durable dans le temps mais restera marginale et devrait atteindre un plafond de production quotidienne(61) inapte à compenser le déclin des autres sources de pétrole.

2.4.6. Prévisions récentes

Ces dernières années les débats quant à la date du pic pétrolier ou l'existence même du phénomène semblent moins polarisés. La reconnaissance par l'AIE du pic pétrolier du brut en 2008 semble avoir donné raison au modèle de King Hubbert et placé le pic de production pétrolier mondial à une échelle de temps suffisamment proche pour être un enjeu pour nos sociétés. Bien que les méthodes d'analyse se soient uniformisées, il existe encore de l'incertitude sur la date réelle du pic pétrolier mondial. En effet, les données nécessaires à l'élaboration des projections sont souvent privées ou incomplètes et tous les organismes n'y ont pas accès de la même manière.

Les organismes paraissant les plus fiables pour réaliser de telles projections sont ceux disposant des données les plus complètes et possédant les compétences les plus appropriées. Parmi eux l'AIE est la plus importante organisation intergouvernementale chargée d'analyser les problématiques en lien avec l'énergie. Les cabinets de conseil indépendants tels que Rystad Energy ou WoodMackenzie, vendent leurs analyses et leurs modèles aux compagnies pétrolières, aux gouvernements ou à l'AIE elle-même. Les compagnies pétrolières disposent ainsi également de données complètes et produisent leur propres rapports et analyses. Leurs outils et bases de données, d'intérêts industriels et économiques, sont rarement publiquement disponibles.

On observe que même au sein de ces organismes, les projections varient avec le temps, lorsqu'elles sont réactualisées. Les projections de production du pétrole brut par l'AIE par exemple sont de plus en plus pessimistes avec le temps(55) (Figure 20). On observe notamment que les projections précédant le pic pétrolier du brut ont été incapables de le prédire. Dans son rapport de 2018, l'AIE alerte sur un risque de resserrement de l'offre de pétrole à l'horizon 2025 que le pétrole de schiste ne pourra pas entièrement compenser(26).

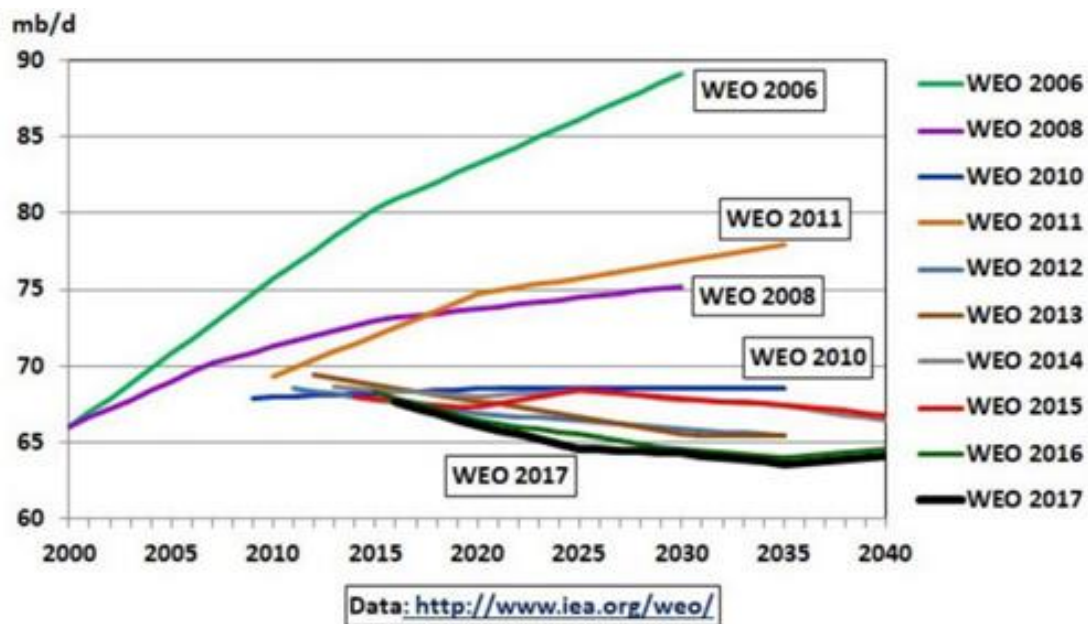


Figure 20 - Evolution des projections de l'AIE sur la production du pétrole brut conventionnel au cours du temps (Source : The Shift Project, 2020)

Une étude de Norouzi *et al.* (2020) a sélectionné un certain nombre d'organismes selon des critères de fiabilité explicites et a compilé leurs différentes projections représentées sur la figure 21(62). La plupart des scénarios prévoient un pic pétrolier global avant 2040, l'intensité du déclin étant proportionnel à la précocité du pic. Cette même étude propose trois scénarios incluant de nombreux facteurs géopolitiques. Deux d'entre eux placent le pic au milieu des années 2020 et le troisième, comportant le plus haut niveau d'impact environnemental, le situe après 2040.

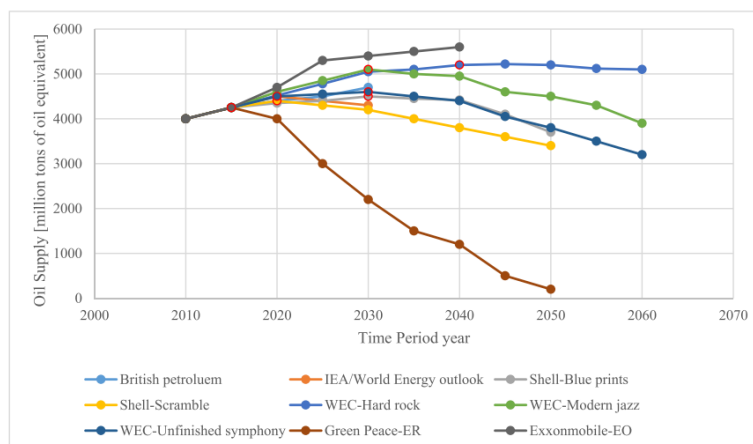


Figure 21 - Différents scénarios de production de pétrole à l'échelle mondiale (Source : Norouzi *et al.*, 2020)

L'article de The Shift Project de 2020 a été réalisé en ayant accès à la base de données et aux modèles de projection de Rystad Energy, offrant un point de vue inédit pour un article d'accès public puisqu'il analyse et explicite directement les données issues de l'industrie pétrolière et fournit une analyse critique des hypothèses de Rystad Energy(55). L'analyse est postérieure au début de la crise du Covid -19 et inclut son impact sur les investissements de l'industrie pétrolière. La projection jugée la plus probable de Rystad Energy est présentée à la figure 22 et montre un pic pétrolier mondial en 2035 à 109 Mbbbl/j, reposant sur des découvertes hypothétiques et précédant un déclin abrupt.

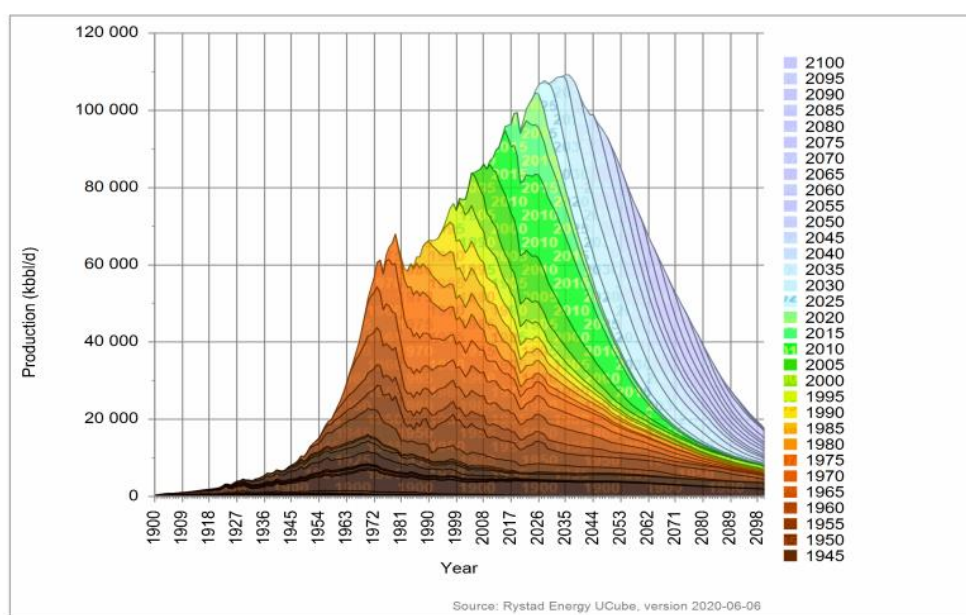


Figure 22 - Production mondiale de carburants liquides par date d'entrée en production des puits et projection jusqu'en 2100 par Rystad Energy (Source : The Shift Project, 2020)

Un certain consensus semble placer le pic pétrolier global avant 2040, voire dès le milieu des années 2020, sachant que certaines organisations ont historiquement eu tendance à surestimer la production de pétrole dans leurs estimations. L'intensité du déclin suivant semble également incertaine mais certaines projections comme celle de Rystad Energy, pourtant jugée optimiste dans certaines de ses hypothèses par l'article de The Shift Project(55), montrent un déclin rapide : le monde aurait en 2060 un approvisionnement en pétrole égal à celui de 1970 pour une population mondiale environ deux fois plus importante(56).

Cependant, la consommation et la production de pétrole sont très inégalement réparties au niveau global, et il semble probable que le pic pétrolier n'impactera pas de la même manière et au même moment toutes les régions du monde. Les pays exportateurs notamment seront plus longtemps capables d'approvisionner leur consommation intérieure que les pays importateurs. Afin d'envisager comment le resserrement de l'offre en pétrole impactera le métier vétérinaire en France, il est ainsi pertinent de s'intéresser plus précisément au cas de l'Union Européenne (UE).

3. Perspectives d'approvisionnement de l'Union Européenne.

3.1. Pays fournisseurs et maturité de leurs réserves

L'association The Shift Project est un groupe de réflexion composé notamment d'experts des questions énergétiques qui, à la demande du Ministère des Armées français, a produit un rapport paru en 2021 évaluant les risques pour l'approvisionnement en pétrole de l'Union européenne dans les décennies à venir, sur la base des données de Rystad Energy(63). Il paraît s'agir, avec leur précédent article de 2020, du travail le plus récent et le plus complet concernant ce sujet et ce sont ses conclusions qui seront majoritairement présentées dans ce qui suit. Malgré la rigueur apparente de l'analyse fournie, celle-ci repose sur une seule banque de données, celle de Rystad Energy, bien que régulièrement comparée aux rapports de l'AIE. Par ailleurs, l'objectif revendiqué de The Shift Project est la production d'analyses aidant à atténuer le changement climatique et visant la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, ce qui comporte un risque de biais, quoique non perçu, dans les hypothèses et les conclusions.

L'UE possède très peu de réserves de pétrole domestique. Seul 4% en 2018 de sa consommation en hydrocarbures provenait d'une production intérieure. L'Union Européenne est donc quasi exclusivement importatrice de pétrole. Le pétrole brut conventionnel représente 90% de sa consommation. Un ensemble de 16 pays exportateurs fournissent 95% des importations nettes de l'UE, en hausse par rapport aux années 2000 où ils fournissaient 91% des importations. Huit d'entre eux comptent pour 78% des importations. L'Union Européenne dépend donc d'un nombre assez restreint de fournisseurs pour son approvisionnement pétrolier. La part relative des importations de ces pays est représentée sur la figure 23(55), les pays en rouge présentant un déclin anticipé important et probable. On observe que la Russie représente près d'un tiers des importations et que l'ensemble des pays d'ex-URSS en représentent 42%. L'UE possède ainsi une dépendance marquée à ces pays. Les fournisseurs les plus importants après la Russie sont l'Irak (8,7%) puis l'Arabie Saoudite (7,4%) et la Norvège (7,2%)(63).

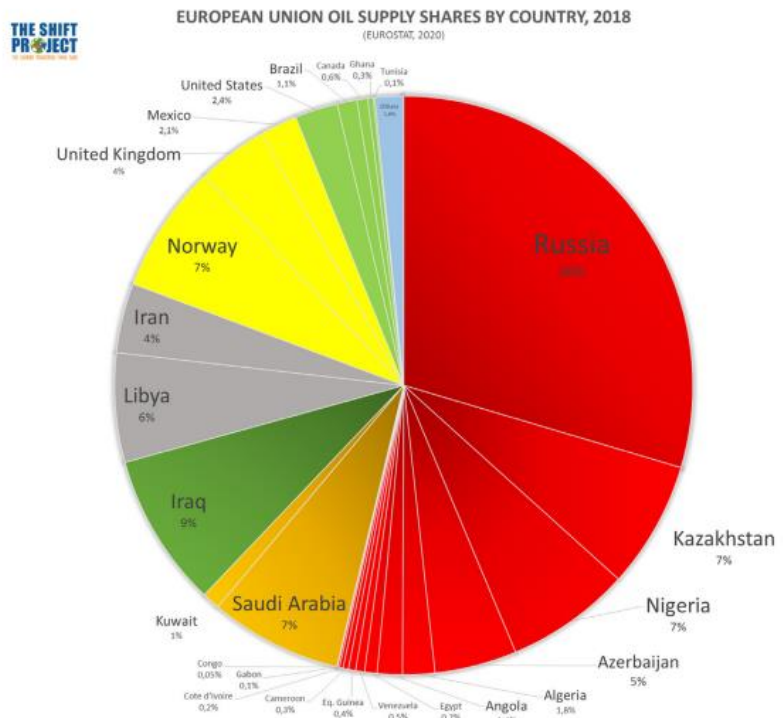


Figure 23 - Approvisionnement relatif en pétrole de l'UE par pays en 2018 (Source : D'après The Shift Project, 2020)

La France a comme particularité d'importer 30% de sa consommation en pétrole sous forme de produits pétroliers raffinés (contre moins de 10% pour l'UE dans son ensemble). Ce type d'importation n'est pas étudié par le rapport du Shift Project. Parmi les pays fournisseurs de pétrole brut, les plus importants pour la France sont le Kazakhstan (15,4%), l'Arabie Saoudite (15,1%) et la Russie (14,3%). L'approvisionnement de la France est ainsi légèrement mieux réparti entre ses différents fournisseurs.

La majeure partie de ces pays fournisseurs possèdent des réserves avec une maturité importante ou en déclin. La Russie aurait passé son pic pétrolier en 2019 et, en incluant les potentielles découvertes qui y sont assez prometteuses, devrait tout de même voir sa production baisser de 30% d'ici 2030 et de 80% d'ici 2050. Le Kazakhstan devrait présenter une baisse de sa production de 8% d'ici à 2030 puis 40% d'ici à 2050. L'Arabie Saoudite possède des champs gigantesques, encore peu matures mais présente peu de perspective de nouvelle découverte. Sa production ne devrait pas manifester de déclin avant 2030 mais déclinerait ensuite de 20% par rapport à sa production de 2019 jusqu'en 2050.

Les seuls pays présentant une croissance franche de leur production sont les Etats-Unis et l'Irak. La croissance des Etats-Unis vient de l'essor du pétrole de schiste mais si ce pays est le premier producteur mondial de pétrole il est aussi le premier consommateur et est importateur net. La croissance de sa production devrait être principalement absorbée par sa consommation domestique. L'on observe tout de même une augmentation des parts d'importation depuis les Etats-Unis ces dernières années, passées de 2,4% en 2018 à 7,6% en 2020. L'Irak devrait présenter l'une des plus importantes croissances de production du monde dans les années à venir en raison de réserves identifiées mais encore non exploitées. Sa production devrait croître de 24% jusqu'en 2040, date de son pic, avant de décroître assez fortement à l'horizon 2050.

L'approvisionnement en pétrole de l'Union Européenne et de la France dépend d'un petit nombre de pays producteurs dont les réserves sont caractérisées par un haut niveau de maturité et sont soit en déclin, soit amenées à l'être à court terme. Les seules perspectives de croissance dans la production de ses fournisseurs viennent des Etats-Unis et de l'Irak, qui ne représentaient en 2018 que 11,4% des parts d'importation de l'UE.

3.2. Prévisions à moyen et long terme

Les projections de l'article de 2020 se basent sur une analyse prudentielle par Rystad Energy de l'évolution de la production des sources de l'Europe, avec des croissances ou des déclinés qualifiés de « probables », « incertains » ou « très incertains ». Il s'en dégage trois scénarios, incluant ou non les croissances « incertaines » et « très incertaines », sur la disponibilité en pétrole des pays fournisseurs d'ici 2030. Les trois tendances ainsi décrites sont visibles sur la figure 24.

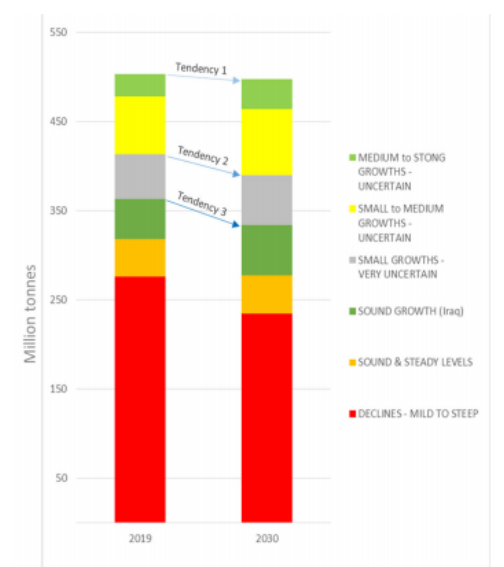


Figure 24 - Evolution de l'approvisionnement de l'UE par scénario de 2019 à 2030
(Source : The Shift Project, 2020)

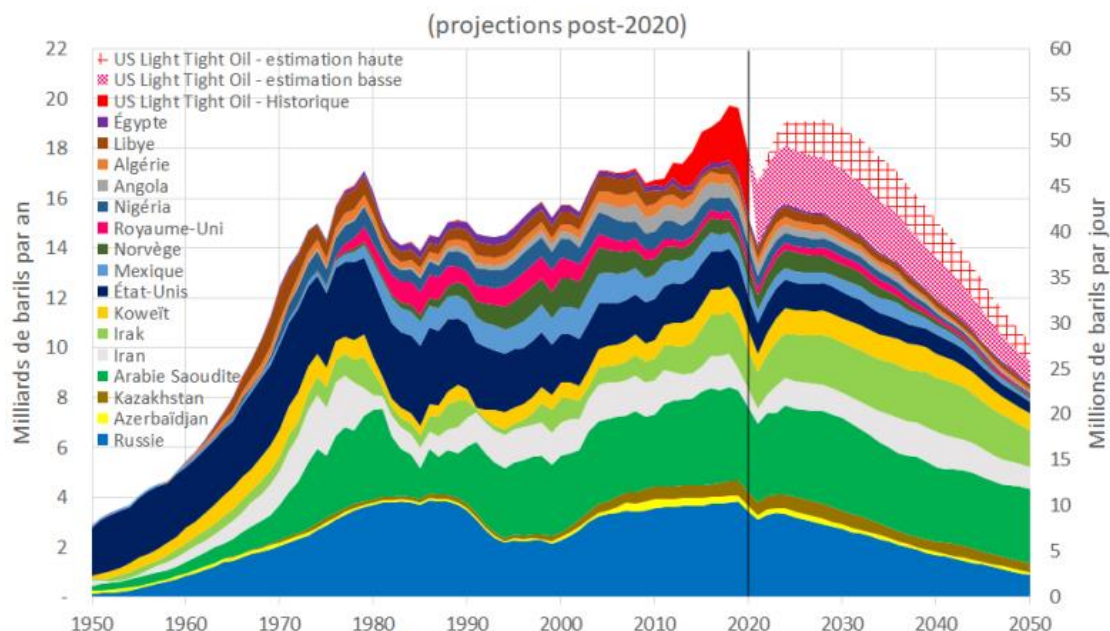
Les projections vont d'une réduction de 1%, si tous les pronostics de Rystad Energy se réalisent à une réduction de 8% sur la décennie si les croissances incertaines et très incertaines ne se produisent pas. Le scénario le plus probable se trouvant entre ces deux pôles.

Ces prévisions sont à mettre en relation avec l'évolution actuelle de la demande en pétrole en Union Européenne qui a la particularité d'être déjà en décline tendancielle depuis 1991. Ce déclin déjà amorcé correspond à la substitution du pétrole par d'autres sources d'énergie dans l'industrie, à la délocalisation de celle-ci dans des pays tiers ainsi qu'à la concurrence importante du marché asiatique dans l'accaparement des sources de pétrole de l'UE. En effet, celles-ci ont augmenté de 15% sur la période de 2005 à 2018 alors que l'approvisionnement de l'Europe s'est réduit de 17%(63).

Si le déclin par année de l'approvisionnement en Europe est inférieur à celui observé lors de la dernière décennie (-0,64%/an), l'on peut supposer que la demande restera inférieure à l'offre et que les conséquences ne seront pas plus marquées que celles déjà observées les années précédentes. La tendance 1 mène à une décline de 0,10% par an d'ici à 2030, soit une décline inférieure à celle observée depuis 1990 tandis que la tendance 3 mène à une décline de 0,75%, supérieure au rythme de la dernière décennie, le plus important jamais observé en Europe. Il apparaît donc que ces projections ne présagent pas d'une rupture probable dans

l'approvisionnement de pétrole mais de la continuation d'un phénomène de déclin déjà en cours, sans modification majeure de sa courbe à horizon 2030.

En revanche, l'actualisation de cette étude dans le rapport commandé par le Ministère des Armées de 2021 réalise des projections de la production des pays fournisseurs de l'UE à un horizon plus lointain selon une trajectoire haute et une trajectoire basse, dont l'écart est principalement déterminé par l'incertitude quant au développement et l'apport sur le marché européen du pétrole de schiste américain(63). Ces projections sont représentées sur la figure 25.



Source: données Rystad Energy - analyse et projections post-2020 The Shift Project

Figure 25 - Production de pétrole des 16 pays fournisseurs de l'UE et projections jusqu'en 2050 (Source : The Shift Project, 2021)

De manière similaire à l'étude de 2020 avec une tendance haute légèrement moins optimiste, le rapport prévoit une certaine stabilité de la production de pétrole des pays fournisseurs dans la décennie 2020 avec un déclin en 2030 de 4 à 10% par rapport à 2019. En revanche, ce déclin s'accélère de manière irréversible à partir de la décennie 2030 avec une décrue de 10 à 20% par rapport à 2019. Sur cette décennie ceci correspondrait à une décrue de 0,6% à 1% par an, soit un déclin égal ou largement supérieur au déclin observé dans la dernière décennie de la consommation de pétrole en UE. Cette tendance ne paraît que s'accroître par la suite.

3.3. Synthèse pour l'Union Européenne

Seuls ces travaux récents semblent disponibles afin de proposer des projections précises et chiffrées pour l'Union Européenne. Ceux-ci admettent cependant plusieurs limites évidentes qui toutefois ne semblent pas changer les conclusions à en tirer. L'utilisation d'une unique base de données réduit certainement la précision des projections mais cette base de données et les modèles utilisés appartenant à ceux de référence mondiale, il paraît hautement improbable que les tendances qui en ressortent changent de nature en multipliant ou en changeant de base de données.

Par ailleurs, c'est la production des pays fournisseurs de l'UE qui est évaluée, et non l'approvisionnement direct de celle-ci. Toutes choses égales par ailleurs, une réduction de la

production de ces pays entraîne logiquement une réduction dans le volume qu'ils exportent à l'Union Européenne mais divers facteurs géopolitiques peuvent invalider cette hypothèse. Cependant, comme le pointe le rapport de 2021(63), supposer qu'en cas de décroissance de la production des pays fournisseurs, l'UE parvienne à garder sa part de marché constante alors même que des pays émergents, eux-mêmes producteurs, voient leurs réserves domestiques décliner et ont une très forte perspective de croissance paraît peu rationnel. Certains liens d'approvisionnement d'importance sont également particulièrement instables, comme le souligne le conflit avec la Russie depuis l'invasion de l'Ukraine en février 2022, pays responsable en 2018 d'un tiers des approvisionnements en pétrole de l'UE qui peut facilement décider de favoriser le marché asiatique à celui européen dans le futur.

Ce rapport n'étudie pas l'option de l'UE de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement auprès d'autres pays. Cependant la tendance historique n'est pas à la diversification des sources et les liens entre pays exportateurs et importateurs sont souvent historiques et géographiques et un changement dans ces relations impliquerait une inertie importante. De plus, comme vu précédemment, l'ensemble des réserves pétrolières mondiales sont amenées à décliner à l'exception des pétroles non conventionnels et là aussi, l'UE serait en concurrence avec les autres pays pour accaparer l'approvisionnement des dernières sources en croissance, d'autant plus que les pays producteurs privilégieront leur consommation domestique, à l'instar des Etats-Unis.

Il apparaît donc que si dans la prochaine décennie, l'approvisionnement en pétrole de l'UE ne devrait pas marquer une modification significative de sa tendance précédente, déjà au déclin depuis les années 1990, celle-ci risque de devenir significative et irréversible dès la décennie 2030, marquant le début d'un déclin dont le rythme n'ira qu'en accélérant. L'Union Européenne est une des premières régions touchées par la raréfaction du pétrole et a déjà passé son pic de consommation. Dès que la réduction de la demande de consommation dû à des politiques volontaires (délocalisation de la production, substitution de source d'énergie dans certains secteurs) sera inférieure à la réduction de l'offre des pays fournisseurs, la réduction deviendra une contrainte subie dont il convient d'en anticiper les conséquences. Que ceci se produise dans deux ou trois décennies ne semble pas changer l'ordre de grandeur de cette échelle de temps, très faible comparativement à celle d'une société et pertinente à celle d'une vie humaine.

4. L'approvisionnement de l'Union Européenne en gaz naturel

Ce travail se concentre essentiellement sur le cas du pétrole. Pourtant il convient d'aborder la question de l'approvisionnement en gaz naturel car celui-ci revêt une importance particulière notamment dans le secteur de l'agriculture. La nature de cette ressource fait qu'elle suit relativement les mêmes logiques que celles concernant le pétrole pour sa disponibilité et son usage. Le gaz naturel est la troisième source d'énergie primaire mondiale et l'AIE anticipe qu'il supplantera le charbon pour la deuxième place derrière le pétrole d'ici à 2030(26). Outre son rôle énergétique il sert également de matière première d'intérêt au sein de la pétrochimie, en particulier pour la production d'engrais(64).

La formation du gaz naturel est similaire à celle du pétrole. Il s'agit de la phase gazeuse composée d'hydrocarbures légers, essentiellement du méthane, résultant des processus de transformation géologiques transformant la matière organique à l'origine du pétrole(5). Sa nature gazeuse implique que le gaz naturel nécessite des conditions géologiques plus strictes pour être piégé que le pétrole mais sa récupération au sein d'un puits de forage est plus facile. Son transport en revanche, nécessite à ce gaz d'être mis sous pression et transporté par des gazoducs ou d'être transformé par cryogénéisation en gaz naturel liquéfié (GNL), ce qui augmente considérablement les contraintes et le coût énergétique par rapport au transport

du pétrole liquide. Comme pour le pétrole, il existe des sources de gaz naturel qualifiées de non conventionnelles.

La nature géologique du gaz naturel le soumet aux mêmes conditions de déplétion que le pétrole et le gaz naturel est voué à atteindre un pic de production. Le maximum des quantités découvertes s'est produit dans les années 70, environ une décennie après le maximum des quantités découvertes pour le pétrole, et les découvertes de gaz déclinent depuis même si plus d'incertitude que pour le pétrole semble peser sur les potentialités de nouvelles découvertes(65). La date du pic de production du gaz naturel est moins étudiée que celle du pic pétrolier et une étude de Jialiang *et al.* rapporte en 2018 qu'aucune recherche systématique n'a été menée afin de déterminer la pic de production de gaz naturel mondial(66). Certaines publications ont cependant avancé une date autour des années 2020 pour le pic gazier(65, 67). L'article de Maggio et Cacciola de 2012 évalue le pic de production du gaz naturel selon différentes méthodes et le place entre 2024 et 2046, retenant la date de 2035 pour le scénario le plus probable(68). Cette étude plaçait le pic de production du pétrole conventionnel en 2015, plus tard que le pic réel de 2008 observé par l'AIE et n'inclut pas toutes les sources de gaz non conventionnelles pour le pic gazier. Plus d'incertitude repose sur la date du pic gazier que sur celle du pic pétrolier car celui-ci est moins rigoureusement étudié par la littérature scientifique publiquement disponible. Les tentatives d'évaluation tendent cependant à situer le pic de production de gaz naturel au cours de la première moitié du siècle, peu après le pic de production de pétrole. Le déclin suivant le pic sera vraisemblablement moins abrupt, avec une phase de plateau plus longue(66, 68).

Concernant l'approvisionnement de l'union européenne en gaz naturel, le rapport l'AIE de 2018 n'évoque pas la problématique mondiale d'un pic de production mais souligne la dépendance de l'Union Européenne aux importations qui devrait atteindre 86% en 2025 suite à la déplétion des sources locales de gaz(26). L'origine du gaz naturel importé en Union Européenne et les projections de l'AIE sont présentées dans la figure 26. En 2017, plus de 30% des importations provenaient de la Russie, deuxième producteur mondial de gaz naturel, et environ 20% de la Norvège via les infrastructures physiques fixes que sont les gazoducs. Les projections, assumant un effort afin de respecter les accords de Paris de 2015, prévoient une hausse de la part du GNL, énergétiquement moins rentable, dans les importations et une hausse de la dépendance à celles-ci. Contrairement au pétrole, la majeure partie des importations est conditionnée par des infrastructures physiques d'ampleur qui ne permettent pas de changer de source d'approvisionnement rapidement.

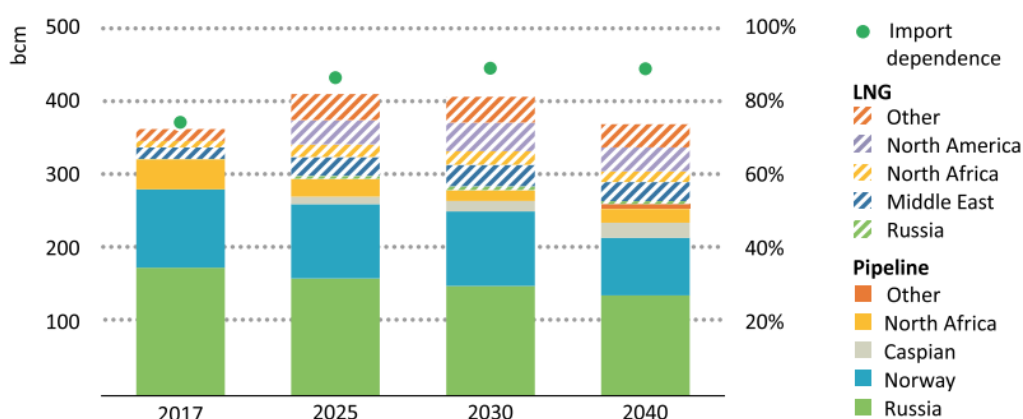


Figure 26 - Importations de gaz naturel en Union Européenne et projections
(Source : D'après World Energy Outlook, AIE 2018)

Le pic de production de gaz naturel norvégien a été prévu autour des années 2020 et s'il est encore trop tôt pour avoir un recul suffisant pour évaluer si ce pays est effectivement en train de passer son pic, les réserves de ce pays sont matures(69). En Russie, les sources de gaz naturel en production ont également un haut niveau de maturité et en incluant la mise en exploitation de nouveaux champs découverts et des découvertes futures probables le pic de production gazier russe devrait se produire entre 2025 et 2030(70). Söderbergh *et al.*, les auteurs de ces recherches, craignent que les fournisseurs actuels de l'Union Européenne soient incapables de supporter la hausse de sa demande.

Par ailleurs l'approvisionnement de gaz naturel en particulier en provenance de la Russie est soumis aux tensions géopolitiques, phénomène renforcé par la dépendance de cet approvisionnement aux gazoducs déjà construits. Les conséquences de l'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022 ont des chances de rendre caduques les projections de l'AIE et soulignent la dépendance de l'Union Européenne envers ses pays fournisseurs pour le gaz naturel et dans une moindre mesure du pétrole. L'AIE anticipe, suite au début de la guerre, une modification du marché du gaz naturel avec une hausse accélérée de la part du GNL dans les importations de l'UE mais souligne la grande incertitude qui pèse sur la question de l'approvisionnement de l'Union Européenne(71). La disponibilité en gaz naturel de l'Union Européenne, ressource fossile d'importance, sera ainsi contrainte par la disponibilité physique de la ressource mais aussi par les tensions géopolitiques entre importateurs et fournisseurs, avec un haut degré d'incertitude.

5. Comment évaluer les conséquences du pic pétrolier

5.1. Les problématiques soulevées

En 2013, Kershner *et al.* pointent que malgré les indices présageant un pic pétrolier mondial imminent, trop peu de recherches ont été entreprises afin d'évaluer les conséquences d'un tel phénomène sur l'économie(72). La pertinence du pic pétrolier comme point de repère dans l'approvisionnement en pétrole vient du fait qu'il amorce un changement inédit dans l'histoire de cette ressource, la courbe de production passant d'une croissance quasi-perpétuelle à un déclin tendanciel. De nombreux auteurs argumentent que le stock global de pétrole extractible et la date de son épuisement total est moins pertinent que son rythme d'approvisionnement et le moment où celui-ci va cesser de croître(42–44, 72). Les crises pétrolières précédentes ont été temporaires et ont cependant significativement marqué l'économie et causé des récessions majeures(73). Pour la première fois, nos sociétés devront évoluer durablement avec un rythme d'approvisionnement en pétrole de moins en moins important alors même que le caractère essentiel de cette ressource et de sa croissance dans leur essor a été précédemment explicité.

A court terme, l'enjeu est donc de savoir si le système économique possède la capacité de maîtriser ce déclin. Si la décroissance volontaire de la consommation est supérieure au déclin naturel de l'approvisionnement, celui-ci est maîtrisé et ses conséquences sont anticipées. Si c'est le taux de déclin qui est supérieur, alors la pénurie de pétrole sera subie, et les différents secteurs qui en dépendent passeront par des crises, potentiellement brutales. A plus long terme, l'enjeu est d'envisager à quoi ressemble une société avec un approvisionnement en pétrole faible et décroissant. En moyenne, selon les projections de Rystad Energy, chaque être humain aura en 2060 à sa disposition autant de pétrole qu'un être humain en 1950(55). Quel niveau de service chaque secteur sera capable d'offrir comparativement à celui précédant le pic et quelle réorganisation au sein de ceux-ci sera nécessaire ?

5.2. Evolution de la disponibilité en pétrole

Par définition, à la suite du pic pétrolier, le rythme de production de pétrole va décroître, ce qui implique une réduction de la disponibilité de cette ressource. La première conséquence attendue est une augmentation des prix. En effet, tel que rapporté par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) dans ses projections pour 2030 et 2050, l'AIE estime que le prix du baril de pétrole sera multiplié par trois entre 2010 et 2050, passant d'une valeur de 78,1 \$ à 231\$(74). En corrigeant cette valeur avec l'hypothèse d'une inflation de 2% par an, le prix du baril en 2050 serait de 172 dollars de 2010, soit un peu plus que deux fois supérieur à sa valeur de 2010. D'autres études évaluant l'impact du pic pétrolier sur l'économie concluent à une augmentation des prix du pétrole(44, 75). Cependant, historiquement le prix du baril s'est révélé très volatil et non strictement corrélé aux variations de production de pétrole(76). Lang *et al.*, en 2020, proposent une description des nombreux facteurs influençant le prix du baril et des différentes tentatives de modéliser l'évolution des prix trouvées dans la littérature. Il en ressort que l'évolution de l'offre par les pays producteurs est un facteur insuffisant pour prédire l'augmentation du coût du baril. En 2012, les recherches de Tverberg tendent à montrer qu'une chute dans l'approvisionnement en pétrole n'entraînerait pas nécessairement une augmentation durable et constante des prix, mais des cycles volatils d'augmentation puis de baisse des prix, entrecoupés de récessions économiques(77). Il semble donc s'agir d'un indicateur particulièrement difficile à anticiper, et si une augmentation brutale du prix du baril en début de crise ainsi qu'une augmentation tendancielle sur le temps long en raison de la rareté de la ressource et du coût des investissements croissants nécessaires à sa récupération sont à prévoir, une forte instabilité est probable. Cette possible volatilité des prix est d'ailleurs une limite soulevée par The Shift Project aux projections de Rystad Energy qui assument une certaine stabilité de ceux-ci dans leurs hypothèses, favorisant les investissements dans l'industrie pétrolière, ce qui pourrait surestimer la production future(63).

Plus qualitativement et indépendamment du cours du baril, une inadéquation entre le niveau de production et la demande en pétrole peut mener à des pénuries strictes de la ressource, celle-ci n'étant tout simplement plus matériellement disponible pour approvisionner tous les secteurs demandeurs. Un arbitrage dans l'attribution de la ressource devra alors se produire. A plus long-terme, la production de pétrole se rapprochant nécessairement de zéro, l'usage de cette ressource ne sera plus une possibilité pour de nombreux secteurs, ou du moins pas à l'ordre de grandeur actuel.

5.3. Limites des théories économiques de l'innovation et de la substitution

Le deuxième point de débat majeur sur l'enjeu du pic pétrolier, après la date d'échéance de celui-ci, se porte sur la capacité de l'économie à innover et à substituer cette ressource par une autre. En effet, plusieurs auteurs manifestent une confiance dans le fait que le progrès technique, stimulé par la raréfaction de la ressource entraînant une hausse de son prix, permettra d'un côté de toujours améliorer les rendements de l'exploitation pétrolière, compensant le déclin de la ressource tout en découvrant de nouvelles sources, et de l'autre d'augmenter l'efficacité énergétique de tous les services usant de pétrole, réduisant les besoins en sa consommation(48, 49, 78, 79). Par ailleurs, ces auteurs argumentent généralement que comme toute ressource, lorsque le pétrole amorcera un réel déclin, l'économie se chargera d'explorer et d'investir dans une nouvelle ressource qui s'y substituera, comme le déclare Maugeri en 2004 dans un article paru dans Science(49), qualifiant de catastrophistes les auteurs alertant sur les conséquences du pic pétrolier.

Selon Stern (1997), cette confiance dans l'innovation et le fait que la substitution d'une ressource à une autre est aisément permise par l'économie provient de l'application des

théories économiques néoclassiques, hégémoniques dans le système économique mondialisé(80). Or, plusieurs auteurs pointent que ces théories économiques ont comme défaut fondamental de ne pas inclure correctement la physique dans leurs hypothèses, et de se concentrer sur des facteurs comme le capital et le travail, exprimés exclusivement en termes monétaires. Pearce en 1997 et Ayres en 2006, par exemple, mitigent sur le plan théorique ce principe de substitution de l'économie néoclassique, reconnaissant une certaine plasticité entre l'usage des ressources mais pas la possibilité d'une substitution totale, chaque ressource ne se valant pas tant dans ses caractéristiques que dans sa disponibilité(81, 82).

Selon Hall et Day, en 2009, les économistes néoclassiques affirment que l'économie possède en son sein les moyens de régler les problèmes de rareté, l'efficacité du libre marché permettant de répondre perpétuellement à la déplétion d'une ressource par l'innovation et la substitution. Ils argumentent également que de telles théories ne prennent pas en compte les facteurs physiques sous-jacents et que les modèles et projections scientifiques se sont historiquement révélés plus fiables que les projections des économistes néoclassiques(83). Ayres note par ailleurs que cette logique théorique poussée au bout de son raisonnement contredirait les lois physiques, celles de l'entropie et de la conservation de l'énergie en particulier : si une certaine chaîne de substitution peut exister celle-ci atteint nécessairement une fin et une perte d'efficacité au long d'elle-même. Ainsi, si pour une production donnée le matériau le plus efficace est utilisé et en raison de sa déplétion doit être remplacé, il le sera nécessairement par des substituts d'efficacité moindre, en moins grande quantité. Seule alors une augmentation de l'énergie investie permettrait d'atteindre le niveau de production initial, dans la limite d'existence des substituts en question(82). Lorsque la ressource à substituer est une source d'énergie, comme le pétrole, alors cette dernière option n'est plus envisageable indéfiniment.

Hall et Klitgaard (2019) affirment que les théories économiques néoclassiques majoritairement mises en application sont dépassées, leur base étant conceptuellement bancal et n'incluant pas correctement les flux d'énergie et de matière(84). Ils rappellent les nombreuses critiques de ces bases conceptuelles provenant du sein même des économistes, néoclassiques ou hétérodoxes, et des sciences naturelles et reprochent un isolement académique de la science économique qui perdrait de fait son caractère scientifique. De ce fait, les théories économiques néoclassique seraient inaptes à prédire et adresser les problèmes relatifs à la raréfaction des ressources et aux enjeux écologiques. Ils appellent à la construction d'un nouveau paradigme économique, une économie biophysique, dont les hypothèses prendraient en compte les lois de la physique et notamment l'importance de la consommation d'énergie comme préalable à toute activité économique.

Supposer que l'autonomie du marché suffira à substituer le pétrole sans modifier significativement nos sociétés ne fait pas consensus au sein du monde scientifique. En effet, au regard du rythme de déclin prévu de la ressource pétrole, de ses caractéristiques intrinsèques d'intérêt (densité d'énergie, état liquide) et de l'ordre de grandeur de son usage actuel, l'éventualité d'une substitution totale de la ressource ou de ses usages par d'autres techniques dans le temps imparti ne peut rationnellement pas être garantie et ces possibilités devraient être évaluées avec rigueur au cas par cas.

5.4. De nombreux secteurs dépendants des produits pétroliers

5.4.1. Différents niveaux de dépendance

Tous les secteurs de l'économie n'ont pas le même usage du pétrole, qualitativement et quantitativement, et présentent donc une vulnérabilité différente à un déclin dans l'approvisionnement de celui-ci. Le degré de vulnérabilité et la nature de celle-ci conditionne

les possibilités de substitution de la ressource afin de permettre le fonctionnement continu du secteur à mesure de la réduction de l'approvisionnement en pétrole.

Certains secteurs qui peuvent ou ont pu utiliser du pétrole comme source d'énergie en sont malgré tout peu dépendants. Le pétrole peut être brûlé afin de produire de l'électricité, cependant d'autres sources d'énergie remplissent très bien cet objectif et seule 3% de l'électricité mondiale est produite à partir de pétrole (part en baisse depuis 1990 où elle était de 11%) contre près de 40% à partir de charbon(3). De la même manière, dans le secteur résidentiel, le chauffage a longtemps été largement assuré par la combustion du fioul, produit pétrolier. Désormais, en France, les produits pétroliers compte pour environ 10% de l'énergie investie dans le secteur résidentiel, en baisse par rapport à 2000 lorsqu'ils comptaient pour 20% environ(40). La majorité de l'énergie investie dans ce secteur vient de l'électricité là où le chauffage électrique était presque inexistant en 1970(85). La substitution du pétrole dans ces secteurs est plausible, ne s'agissant pas d'une énergie sous une forme indispensable et dont le volume consommé est déjà modeste.

En revanche, d'autres secteurs montrent une vulnérabilité à une contraction d'approvisionnement en pétrole bien plus élevée. Cette vulnérabilité peut être due à la supériorité du pétrole par rapport aux autres formes d'énergie afin de remplir sa fonction. Dans le cas des transports, comme vu précédemment, en raison de la densité énergétique et de l'état liquide du pétrole, celui-ci peut être facilement transporté par de petits véhicules, leur octroyant une grande autonomie et une grande souplesse dans les déplacements qu'aucune autre source d'énergie ne permet.

La vulnérabilité peut également venir de l'exclusivité du pétrole comme source d'énergie actuelle d'un secteur. L'énergie investie dans l'agriculture en France dépend à 95% de produits pétroliers, pour la mécanisation et pour la production d'engrais(86). Substituer le pétrole dans ce secteur revient à profondément modifier son organisation (le cas de l'agriculture sera largement étudié dans la partie 2).

Enfin, un secteur peut être rendu vulnérable par son propre essor. Le rapport de l'AIE sur la pétrochimie de 2017 décrit que ce secteur montre depuis les années 80 une croissance importante, largement supérieure à celle du PIB et donc, relativement, supérieure à de nombreux autres secteurs de l'économie(64). En 2017, la pétrochimie produisait pour 30% d'engrais azotés et plus de 40% de produits plastiques en utilisant des produits pétroliers soient comme source d'énergie soit comme matière première, comptant pour 14% de la consommation de pétrole mondiale (2^e secteur le plus consommateur). Dans les projections de l'AIE, la demande en produits pétrochimiques, et en particulier en plastiques est amenée à augmenter de 60% d'ici à 2050, alors même que l'approvisionnement en pétrole est amené à se réduire. Même dans le seul scénario compatible avec les objectifs de développement durable de l'ONU, c'est le seul secteur qui devrait montrer une croissance de la consommation de pétrole. La demande croissante en produits pétrochimiques rend ce secteur particulièrement vulnérable à des ruptures d'approvisionnement en pétrole.

Un secteur peut évidemment cumuler plusieurs vulnérabilités : Les transports par exemple sont dépendants du pétrole d'une part car il s'agit pour lui d'une source d'énergie de qualité supérieure pour son fonctionnement mais également car le pétrole représente actuellement la quasi-totalité des carburants utilisés dans le secteur.

5.4.2. Cas particulier des transports

Outre les vulnérabilités intrinsèques de ce secteur, celui-ci représente en lui-même une vulnérabilité pour l'ensemble de l'économie. En effet, les transports sont étroitement connectés à tous les autres secteurs de l'économie et agissent comme son système sanguin.

Ils permettent les déplacements des individus et des marchandises à toutes les étapes des chaînes de production, de la récolte des matières premières à la vente au consommateur(87). Une crise dans ce secteur impacterait nécessairement tous les autres. Le coût du transport étant incrusté dans le prix des marchandises, ce dernier devrait augmenter avec le premier, quel que soit le secteur dont il est issu. De même, une tension sur l'approvisionnement en pétrole causant des pénuries de carburant peut amener à rompre des chaînes de production, entraînant également des pénuries dans les productions concernées. A terme, la simple réduction de la quantité de carburant disponible d'année en année mènerait à une réduction du volume global des transports et incidemment à une réduction dans le volume d'échanges réalisés, menant donc soit à une contraction du système économique soit à sa réorganisation en raccourcissant les chaînes de production afin de réduire proportionnellement sa dépendance aux transports.

En réalité, tous les secteurs de l'économie sont interconnectés à des degrés divers et peuvent rarement être pris en compte indépendamment. La plasturgie par exemple fournit en pièces de nombreuses autres productions et une crise dans ce secteur les impacterait inmanquablement. Cependant, l'ubiquité du système de transport dans l'ensemble de l'économie ainsi que sa dépendance toute particulière au pétrole, énergie des transports par excellence, en fait un secteur à part quant aux conséquences du pic pétrolier.

5.5. Dépendance du système économique à la croissance

La croissance économique se définit comme l'augmentation sur une durée de la production de biens et de services au sein d'un espace. Le PIB est un indicateur fréquemment utilisé pour son évaluation, mesurant la production de richesses du monde ou d'un pays via la valeur monétaire des activités économiques en son sein. Par l'augmentation de la quantité de biens et de services, la croissance économique est supposée garantir une augmentation de la qualité de vie des individus, par l'amélioration de leur confort matériel et l'accès à des services comme la santé ou l'éducation. Malgré de nombreuses limites soulevées par de nombreux auteurs quant à la fiabilité du PIB comme indicateur de bien-être et de progrès d'une société et sa fiabilité afin de mesurer la croissance économique réelle, récapitulées dans l'article de Giannetti *et al.* de 2015, la recherche de la croissance économique et donc de l'augmentation du PIB est au cœur des politiques économiques mondiales(88). En Union Européenne, la recherche de la croissance économique est inscrite dans ses traités constitutifs(89).

Cependant, il a été vu précédemment que la croissance dans la consommation d'énergie est un facteur causal essentiel de la croissance économique. La consommation de pétrole, en tant que source d'énergie correspondant à 31,6% (en 2018) de l'énergie finale consommée dans le monde et source d'énergie essentielle du secteur des transports qui sous-tend la croissance de l'ensemble des secteurs de l'économie, est donc déterminante pour la croissance économique globale.

En effet, dans un papier de 2010 Hamilton a passé en revue l'histoire des chocs pétroliers aux Etats-Unis depuis 1945 et montre que dix récessions sur onze ont été précédées par une augmentation du cours du baril, incluant la crise financière de 2008(90). Or à la suite du pic pétrolier, cette consommation va se réduire et certains supposent même qu'en raison de la place centrale du pétrole dans l'économie, son pic marquera également le début d'un pic de la consommation globale d'énergie(91). L'économie devrait ensuite évoluer dans un environnement de contraction énergétique permanente et de nombreux auteurs argumentent que la croissance économique sera structurellement incapable de se maintenir(83, 92). En 2011 Tverberg explore différents scénarios et anticipe que dans le cas où le prix du pétrole augmente ou que sa disponibilité globale baisse, une récession économique se produirait dans les pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de

développement économiques), avec défaut de paiement des dettes. Une large partie de l'économie reposant sur le remboursement en temps et en heure de prêts, ceci réduirait les crédits disponibles et handicaperait l'investissement dans les solutions permettant d'atténuer les effets du pic. Ces difficultés économiques endommageraient également les autres secteurs de l'énergie, engendrant un cercle vicieux où l'approvisionnement énergétique et l'économie se dégraderaient mutuellement(77). Différents scénarios d'adaptation au pic pétrolier, développées par Hirsch en 2008(93) et rapportés par Curtis en 2009 impliquent un niveau d'investissement très important, notamment dans les infrastructures des transports, afin de les rendre moins dépendants au pétrole, et semblent malgré tout inaptes à éviter un raccourcissement de la longueur des chaînes de production globale et du volume échangé(32). Cet auteur parle d'un « pic de la mondialisation », aggravé par le changement climatique.

5.6. Gérer l'incertitude : analyse de risque et échelle de temps

A ce stade, il semble que suffisamment d'éléments contribuent à caractériser un danger, la chute de l'approvisionnement en pétrole à relativement court terme, dont les conséquences sont susceptibles de profondément bouleverser l'organisation de nos sociétés. Cependant, en raison de la technicité du problème et de son caractère multifactoriel, de nombreuses incertitudes persistent : la date du pic, la pente du déclin, la soutenabilité du système économique dans un monde en contraction énergétique, la vitesse de mise en place de politiques d'adaptation en sont autant d'exemples. Bien qu'à mesure que le problème se rapproche et que les études à son sujet s'accumulent et progressent, réduisant les plages d'incertitudes, ces dernières ont pu contribuer à retarder la prise de conscience du danger et son anticipation. En effet, pour la majeure partie des facteurs étudiés, il existe dans la plage d'incertitude un scénario favorable, mitigeant la gravité du problème. Les débats historiques sur la date du pic du pétrole conventionnel en sont un exemple : si la majorité des projections ont prédit assez justement la date réelle, des scénarios plus optimistes ont toujours été avancés(50).

Afin de se faire une idée rationnelle des enjeux, il paraît pertinent d'aborder le problème par analyse de risque. Au vu des éléments rapportés précédemment, il semble raisonnable d'affirmer que le risque que l'approvisionnement en pétrole mondial, et à fortiori de l'Union Européenne, se dégrade de manière importante et à court terme est fort. Parallèlement, l'éventualité que des découvertes majeures, ou une percée technique d'envergure permettant de compenser durablement le déclin, bien qu'existante, est faible. Il reste à caractériser le risque que la vitesse d'advenue des conséquences du pic pétrolier dépasse les capacités de nos sociétés à mettre en place des mesures d'adaptation afin d'anticiper et d'accompagner le déclin. Là encore, au vu de la dépendance du système économique à la source énergétique pétrole, des dynamiques en cours (croissance de la consommation et de la population notamment) et de l'échelle de temps du problème, le risque que des crises importantes bouleversent de nombreux secteurs paraît élevé.

Les incertitudes dépendent également de l'échelle de temps à laquelle l'on se projette. A l'échelle de deux décennies, les conséquences du déclin, relativement faibles, sont variables selon son intensité et difficiles à prévoir. A moyen terme en revanche, dans les décennies qui suivent, il apparaît bien plus certain que la réduction de la disponibilité en pétrole, bien plus marquée, rendra nécessaire la réorganisation de nombreux secteurs. Enfin, à long-terme, l'épuisement quasi-total de la ressource nécessite d'envisager le fonctionnement d'une société sans celle-ci, ou à un niveau très marginal. Malgré tout, ces trois échelles de temps restent pertinentes pour une vie humaine. Une personne naissant aujourd'hui devrait traverser toutes ces évolutions au cours de sa vie.

L'anticipation des conséquences du pic pétrolier sur un sujet particulier, telle qu'entreprise dans la partie II pour le métier de vétérinaire, nécessite donc de se projeter à différentes échelles de temps et implique une part d'incertitude. Cependant, la nature progressive du phénomène implique que le risque d'advenue d'une conséquence anticipée augmente avec le temps, de telle sorte que si le risque est surestimé sur une période donnée, il n'en reste pas moins pertinent pour la suivante.

Résumé de la première partie :

Il a été ici mis en évidence que les caractéristiques physiques du pétrole en ont fait une ressource dont l'exploitation a été essentielle dans le développement exponentiel des sociétés industrielles et de la mondialisation. Encore aujourd'hui, cette ressource soutient largement l'ensemble de l'économie qui en est dépendante notamment par son utilisation comme carburant dans le secteur des transports. Cependant, le rythme de consommation croissant de pétrole associé au déclin du taux de découverte et au niveau de maturité des champs en exploitation devrait conduire à un pic de production mondial aux alentours de 2035. Ce pic pétrolier marquera une situation inédite dans l'histoire de l'exploitation de cette ressource puisque de moins en moins de pétrole sera par la suite disponible, son approvisionnement entamant un déclin abrupt jusqu'à ce qu'il ne soit plus que marginalement présent dans le mix énergétique mondial. En particulier, l'approvisionnement de l'Union Européenne en pétrole devrait manifester un déclin de 10% à 20% à l'issue de la décennie de 2030 par rapport à l'année 2019. Malgré de nombreuses incertitudes, ce changement net de tendance dans l'approvisionnement en pétrole représente un risque de choc important pour divers secteurs de la société. Il convient dorénavant d'étudier les dépendances du milieu vétérinaire à cette ressource et d'évaluer les conséquences que son déclin aura sur les activités de la profession. Ce faisant, il est nécessaire d'étudier rationnellement les perspectives de substitution de la ressource, lorsqu'elles existent, et les modifications structurelles impliquées, secteur par secteur.

Partie 2 : Dépendances de la profession vétérinaire au pétrole et conséquences d'une contraction de son approvisionnement

1. Pauvreté de la recherche associant pic pétrolier et secteur médical

Comme tout secteur économique de la société, le secteur de la santé vétérinaire repose en partie sur l'usage et la consommation de produits pétroliers. Evaluer ses différents niveaux de dépendance à cette ressource est nécessaire afin d'anticiper les conséquences du pic pétrolier sur la santé vétérinaire. Cette démarche est d'autant plus importante que, alors que les secteurs de la santé vétérinaire et de la santé humaine sont souvent catégorisés différemment, l'approche « One Health » montre que santé humaine et santé animale sont étroitement connectées, en particulier dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources, tel que l'argumente Zinsstag *et al.* en 2018(94). En effet, l'émergence de zoonoses dont la pandémie de Covid-19 est l'exemple récent le plus frappant, ainsi que l'importance actuelle de l'élevage dans le système agro-alimentaire et donc dans la sécurité alimentaire mondiale impliquent que la pratique de la médecine vétérinaire, au sens large, est déterminante pour la santé humaine(95).

Dans un article de 2021 et en s'inspirant de travaux réalisés en médecine humaine, Koytcheva *et al.* réalisent une revue systématique des recherches concernant la pratique vétérinaire et la soutenabilité environnementale(96), domaine au sein duquel devrait figurer le pic pétrolier et ses implications. Ils n'identifient que trois articles revus par les pairs, provenant du Royaume-Uni, adressant ce sujet, dont deux concernent l'élevage bovin et l'un l'anesthésie. Si la consommation de pétrole est un facteur de dégradation environnementale et de non-soutenabilité, et que les propositions d'adaptation de ces articles sont pertinentes afin d'anticiper un déclin en produits pétroliers et de s'y adapter, ces articles ne se concentrent pas sur la problématique du pic pétrolier précisément. D'autres travaux plus spécifiques de ce sujet ont pu être dénichés mais la recherche portant sur celui-ci semble être particulièrement pauvre.

Les recherches questionnant l'impact du secteur médical sur l'environnement et les conséquences de la dégradation de celui-ci sur la santé humaine sont assez nombreuses(94). Cependant, au sein du domaine médical de la santé humaine, Hess *et al.* rapportent en 2011 que très peu de données existent concernant le coût énergétique de la santé et les différents usages du pétrole dans le secteur (transports, plastiques, médicaments etc.)(97). En 2009 Frumkin *et al.* cherchent à évaluer l'impact du pic pétrolier sur la santé publique. Malgré l'émergence de travaux de « littérature grise », ils regrettent la quasi-absence de discussion scientifique à ce sujet, aucun travail revu par les pairs ne traitant alors de cette problématique.

Comme le proposent Koytcheva *et al.*, il convient alors de se reposer sur les ressources d'autres secteurs en lien avec la médecine vétérinaire afin d'approcher au mieux les conséquences du pic pétrolier sur la pratique vétérinaire(96). Plus de recherches sont néanmoins nécessaires afin de préciser les phénomènes à l'œuvre, quantifier au mieux les changements attendus et réduire l'incertitude des prévisions.

2. Impact du pic pétrolier sur la dépendance directe de la pratique vétérinaire aux transports

2.1. Intervention des transports dans les activités quotidiennes d'une clinique

2.1.1. Les déplacements des travailleurs

Les transports jouent un rôle direct dans le domaine médical, et à fortiori dans le domaine vétérinaire, à de nombreux niveaux. En effet, afin d'assurer l'activité quotidienne d'une

clinique vétérinaire, des déplacements sont requis par les travailleurs de la clinique (Vétérinaires, auxiliaires spécialisés vétérinaires (ASV), agents d'entretien) afin de se rendre sur leur lieu de travail. Ces déplacements sont également requis par les vétérinaires dans le cadre de déplacements professionnels, en particulier pour les filières rurale et équine et par la clientèle qui, principalement en filière canine, doit se rendre à la clinique d'elle-même, et enfin pour assurer la logistique de la livraison de matériel et de médicaments.

Aux Etats-Unis, en santé humaine, les transports représentent le poste de consommation de pétrole le plus important, le transport des travailleurs comptant pour la majorité de cette consommation(97). En 2011 Hess *et al.* réalisent une estimation de la consommation de carburant d'un système de santé américain pour les déplacements des employés de leur domicile à leur lieu de travail, regrettant l'absence de données préalables. Ils estiment à environ 11 000 litres d'essence consommés par an et par travailleur pour ces trajets uniquement(97). Ce chiffre est surestimé car il ne prend pas en compte le co-voiturage ou l'usage de transports en commun mais donne un ordre de grandeur. La structure spatiale d'un système de soin est évidemment variable d'une région à une autre (et à fortiori d'un pays à un autre) et celle d'un système de soin vétérinaire ne peut certainement pas être considéré comme identique à celui d'un système de soin de santé humaine. Une telle compilation de données ne semble cependant pas exister à ce jour concernant la pratique vétérinaire en France. Une enquête pour un article traitant des accidents au travail des vétérinaires en Allemagne indique que sur près de 500 vétérinaires interrogés, la distance moyenne au travail est de 6,3 km(98). Ce travail date de 2000 et cette valeur a pu évoluer entre-temps.

2.1.2. Les déplacements de la clientèle

L'activité vétérinaire dépend également des déplacements de sa clientèle, en particulier dans la filière des petits animaux où les propriétaires se rendent majoritairement d'eux-mêmes au cabinet. En médecine humaine aux Etats-Unis, les estimations des distances réalisées par les patients sont variables et tendent à être inférieures à celles des travailleurs(97). Il n'est pas certain que cette conclusion soit applicable à la filière petits animaux de la médecine vétérinaire au vu du nombre important de consultations réalisées par un vétérinaire canin au cours d'une journée, chacune nécessitant au minimum un aller-retour du propriétaire. Plus de recherches sont nécessaires afin d'évaluer correctement les déplacements de la clientèle.

Ces déplacements représentent cependant un coût pour le propriétaire qui s'ajoute à celui des soins et peut intervenir dans le choix de faire soigner son animal. L'impact de la distance et du coût du trajet a été montré comme déterminant en santé humaine lors de thérapie nécessitant des rendez-vous répétés auprès de spécialistes souvent situés à une distance importante du patient(97). L'accessibilité de la clinique, et donc la possibilité qu'ont les clients de s'y rendre, est ainsi primordiale à son bon fonctionnement.

2.1.3. Les déplacements professionnels

Concernant les déplacements professionnels peu de données sont disponibles. La nature de l'activité de soins aux grands animaux des filières rurale et équine implique plus de déplacements quotidiens que la pratique canine car le vétérinaire se rend généralement sur place au lieu de recevoir le patient au cabinet. La durée comme le prix de ces déplacements sont ainsi des composantes essentielles de l'organisation de la pratique.

Depuis la fin de la 2^e guerre mondiale, c'est la voiture individuelle qui prime pour ces déplacements(99). Une étude finlandaise a interrogé en 2000 l'ensemble des vétérinaires de ce pays, recueillant les réponses de deux tiers d'entre eux (n=785)(100). La somme des déplacements professionnels (incluant ici également les trajets domicile-travail) était en

moyenne de 20 900 km/an par vétérinaire. Les vétérinaires communaux, catégorie de vétérinaires finlandais payés par leur commune pour un travail à dominante rurale et des missions sanitaires, réalisaient 30 000 km/an en moyenne. Cette catégorie représente 27% des vétérinaires finlandais. Ici aussi, la structure du maillage vétérinaire finlandais peut être différente de celle du maillage français ou des pays d'Europe de l'Ouest et est susceptible d'avoir évolué en 20 ans. En Allemagne, la même année, la distance des trajets professionnels (hors déplacement domicile-travail) était en moyenne de 69 km quotidiens par vétérinaire interrogé et 46,7% d'entre eux parcouraient des distances supérieures à 50 km(98). Bien que le droit du travail allemand soit différent, en assumant 216 jours de travail par an, cela représente 14 900 km parcourus par an par vétérinaire (Environ 17 600 km en incluant un aller-retour au domicile par jour). Cette moyenne est inférieure à celle rapportée en Finlande mais se trouve dans le même ordre de grandeur.

La pratique vétérinaire repose sur une quantité importante de déplacements professionnels au-delà du simple trajet domicile-travail, en particulier pour la pratique rurale et équine. En 2022, 17,3% des vétérinaires inscrits à l'ordre en France ont une activité rurale pure ou à dominante rurale et 5,8% des vétérinaires déclarent une activité équine pure ou à dominante équine pour un total de 23,1% des vétérinaires dépendants de déplacements professionnels significatifs(101).

2.1.4. Les livraisons de matériel et médicaments

Classiquement, une clinique vétérinaire reçoit plusieurs livraisons par semaine afin de renouveler ses stocks de médicaments ou de matériel médical (consommables, équipements individuels...). En médecine humaine, ces fournitures sont dépendantes des transports afin d'approvisionner efficacement les structures de soin(102) et il paraît raisonnable de comparer les chaînes d'approvisionnement alimentant la médecine humaine et celles de la médecine vétérinaire. En effet, les chaînes d'approvisionnement des produits pharmaceutiques sont intégrées dans un système de production globalisé, avec de nombreuses étapes : l'extraction des matières premières, la manufacture des produits, la distribution via des structures de stockage et de logistique et enfin la structure de santé (clinique vétérinaire) qui en fera un usage final(103). Ces chaînes sont loin d'être linéaires et des transports sont requis entre chaque étape.

2.2. Impact du pic pétrolier et bouleversements attendus

2.2.1. Vulnérabilité du secteur des transports au pic pétrolier

La dépendance du secteur des transports à la ressource pétrole a été précédemment mise en évidence. L'intensité de cette dépendance rend ce secteur particulièrement vulnérable au pic pétrolier et à une contraction importante à court terme de la disponibilité de cette ressource. Pour rappel, 60% des produits pétroliers mondiaux sont utilisés dans le secteur des transports dans une dynamique de croissance (Figure 5). Cette part baisse à 40% dans le cas de la France, ce qui reste significatif et n'inclut pas les transports nécessaires à l'import de marchandises(40). Au sein du secteur, le pétrole est utilisé comme carburant presque exclusif à 93%. Il représente une forme d'énergie idéale pour les transports dont la substitution à niveau de service égal à court terme paraît hautement improbable. Les volumes de pétrole actuellement consommés dans le secteur, l'exclusivité de l'usage de cette ressource et l'échelle des infrastructures en place pour cet usage ainsi que la croissance attendue de la demande en pétrole dans ce secteur (de l'ordre de 10% d'ici à 2030(104)) expliquent cette vulnérabilité et rendent improbable qu'un déclin marqué et constant de la disponibilité en pétrole puisse être compensé sans mettre en tension ce secteur.

2.2.2. Hausse du prix du déplacement

A court et moyen terme il est probable que la rareté croissante du pétrole ait comme conséquence l'augmentation du prix du déplacement, soit en raison de la hausse du prix du carburant, soit en raison du coût global impliqué dans la transition et l'utilisation de moyens de déplacement alternatifs et nécessairement moins efficaces énergétiquement. A moins de politiques publiques prenant en charge l'ensemble de l'augmentation des coûts impliqués pour l'ensemble de la population, cet effet devrait se faire ressentir tant à l'échelle individuelle qu'à l'échelle d'une entreprise.

Dans le cas d'une clinique vétérinaire, ceci signifie une hausse des frais kilométriques dus aux déplacements lors d'une activité itinérante. Ce phénomène a déjà été rapporté par des vétérinaires interrogés dans le cadre d'un article de la Semaine Vétérinaire en 2008 à la suite de l'augmentation des cours du pétrole(105). Pour 62,5% d'entre eux une augmentation des frais kilométriques en a été une conséquence. Si ces frais ne sont pas proportionnellement répercutés sur le prix des prestations vétérinaires, ce qui, comme le pointe l'article, n'est pas facilement réalisable lors d'une augmentation brutale, il s'agit d'une perte de revenus sèche pour la structure vétérinaire.

2.2.3. Hausse du prix du matériel et des médicaments

Dans la valeur d'une marchandise est incorporé le prix de son transport. Une hausse de celui-ci est donc vouée, toutes choses égales par ailleurs, à augmenter le prix du matériel médical et des médicaments livrés à la clinique, augmentant in fine le coût des soins. Cette vulnérabilité de la médecine est pointée par les articles de Frumkin *et al.* et de Hess *et al.*(97, 102), et ces conséquences ont également été rapportées par la Semaine Vétérinaire en 2008 en France(105).

2.2.4. Risques de pénuries

Au-delà de l'augmentation du prix du déplacement, une inadéquation entre la disponibilité en pétrole et la demande des transports peut entraîner des ruptures d'approvisionnement et des pénuries de carburant. Une partie des services de livraison et des déplacements en général ne peut plus avoir lieu. Les travailleurs et la clientèle peuvent alors rencontrer des difficultés à rejoindre la clinique avec leur véhicule individuel. D'autres méthodes de transport (covoiturage, vélo, transports en commun) pourraient partiellement pallier le phénomène mais de manière très hétérogène selon que l'environnement soit rural ou urbain et avec une probable augmentation du temps consacré au déplacement. La prise en charge des urgences par exemple pourrait être gravement retardée si le propriétaire de l'animal ne dispose pas d'un moyen de transport. Lors d'une pénurie, la médecine itinérante quotidienne pourrait être restreinte, réduisant directement l'activité de la clinique.

Lors des pénuries de carburant de 2016, à la suite du blocage des raffineries française, la Semaine Vétérinaire rapporte que seuls 20% des vétérinaires interrogés indiquent que leur activité a été fortement impactée, sans plus de précision(106). L'on peut toutefois supposer que les pratiques rurale et équine y soient surreprésentées (pratiques qui concernent plus de 23% des praticiens) et que dans le cas de pénuries plus longues, répétées dans le temps, l'impact se fasse ressentir de manière plus importante.

Frumkin *et al.* incitent à anticiper le risque de pénuries à court-terme, en établissant des méthodes de rationnement du carburant en cas de pénurie avec une certaine priorité accordée aux structures de soins, aux hôpitaux et aux véhicules de santé et de prévoir des logements sur place pour les équipes médicales(102). Il n'est cependant pas garanti que les services vétérinaires soient inclus dans de tels plans publics.

Enfin, les pénuries risquent d'impacter également les chaînes d'approvisionnement de matériel médical et pourraient aggraver les phénomènes de rupture de stock de médicaments et matériel déjà observés(107). En effet, la recherche de la réduction des coûts au long de ces chaînes a conduit à réduire les stocks et à diversifier les acteurs à chaque étape, créant des chaînes à « flux-tendu ». Ainsi, parmi les risques pesant sur leur bon fonctionnement évaluées par Breen *et al.* en 2008, la perturbation des transports incluant la disponibilité en carburant est classée dans les plus importants avec une note de 7,5/10(108). Une perturbation à un certain point de la chaîne peut alors se répercuter tout au long de celle-ci en raison de sa complexité et des nombreux maillons interconnectés(109).

2.2.5. Baisse du budget et du temps de la clientèle

L'augmentation du prix du déplacement augmentera ce poste de dépense pour les ménages, réduisant du même coup leur budget à allouer au reste, et notamment aux soins vétérinaires. De plus, la difficulté à se déplacer et la surconsommation de temps que cela peut représenter pourrait également être un facteur réduisant la demande de la clientèle en service vétérinaire, en particulier en filière canine.

2.3. Epuisement à long terme de l'approvisionnement en carburant : réorganisation nécessaire des modes de déplacements

2.3.1. Evaluation de la viabilité des modes alternatifs de transport pour la mobilité légère

2.3.1.1. Voiture électrique à batterie

Les pénuries de court-terme sont vouées à se transformer en une réduction durable et majeure de la disponibilité en carburant à moyen et long-terme. Il sera alors nécessaire de se passer d'une partie des déplacements ou de réaliser une transition vers de nouveaux modes de transport. Une alternative prometteuse pour la mobilité individuelle est l'usage de véhicule électrique selon l'avis de l'ADEME de 2016, tant pour réduire la dépendance du secteur des transports aux énergies fossiles que pour réduire les émissions de gaz à effet de serre(110). Un véhicule électrique à batterie (VEB) fait appel à l'énergie électrique stockée dans une batterie afin de se mettre en mouvement. La production d'électricité est moins vulnérable au pic pétrolier que les carburants habituels dans le sens où le pétrole n'est pas une source d'énergie primaire pour sa production mais reste dépendante du reste de ses conséquences sur l'économie et les transports. L'utilisation de véhicules électriques permettrait en principe de conserver un mode de déplacement rapide n'utilisant pas de produits pétroliers (essence, diesel) comme carburant.

Une batterie n'est cependant pas aussi efficace que le pétrole. Bien que la densité énergétique d'une batterie au lithium a considérablement progressé en passant de 200 Wh/L à 700 Wh/L entre 1990 et 2018, cette croissance est devenue beaucoup plus lente depuis 2015(111). L'autonomie moyenne d'une voiture électrique permet de parcourir 250 km, avec une certaine variabilité selon les conditions de température ou de conduite par exemple(112). Si ce rayon d'autonomie ne permet pas de longs trajets, il paraît cependant suffisant pour subvenir aux besoins d'une mobilité moyenne, dans le cadre des déplacements quotidiens ou d'une activité professionnelle telle que celle d'une clinique vétérinaire. La recharge de la batterie est plus longue que le remplissage d'un réservoir de carburant liquide et nécessite une infrastructure particulière. Aujourd'hui les prises murales de recharge les plus rapides permettent une recharge complète en quelques heures selon le véhicule et les bornes rapides présentes sur les autoroutes une recharge de 80% de la batterie en 30 minutes, les derniers 20% étant plus longs à recharger(113, 114). Ici encore, dans le cadre d'une mobilité moyenne

professionnelle, l'organisation nécessaire afin d'avoir des véhicules disponibles chargés semble réalisable. En ce qui concerne les déplacements quotidiens de la clientèle ou des travailleurs, en revanche, la mise en place de station de recharge individuelle n'est pas forcément évidente, notamment en milieu urbain où la place au sol est limitée par rapport à la densité d'habitants et où tout le monde ne dispose pas d'un parking privé, l'accessibilité à la recharge facile et rapide des véhicules électriques risque ainsi d'être inégale(114).

Le coût d'une voiture électrique individuelle a longtemps également été un frein à son développement. Cependant, à mesure que la technologie progressait, le prix d'une pile au lithium, composant de la batterie d'une voiture a baissé de 98% entre 1990 et 2018, atteignant le prix d'environ 200\$(111). Cette évolution est représentée à la figure 27. Ce prix est projeté descendre à 20\$ en 2030. La baisse du prix comparativement au gain de densité énergétique des batteries est spectaculaire.

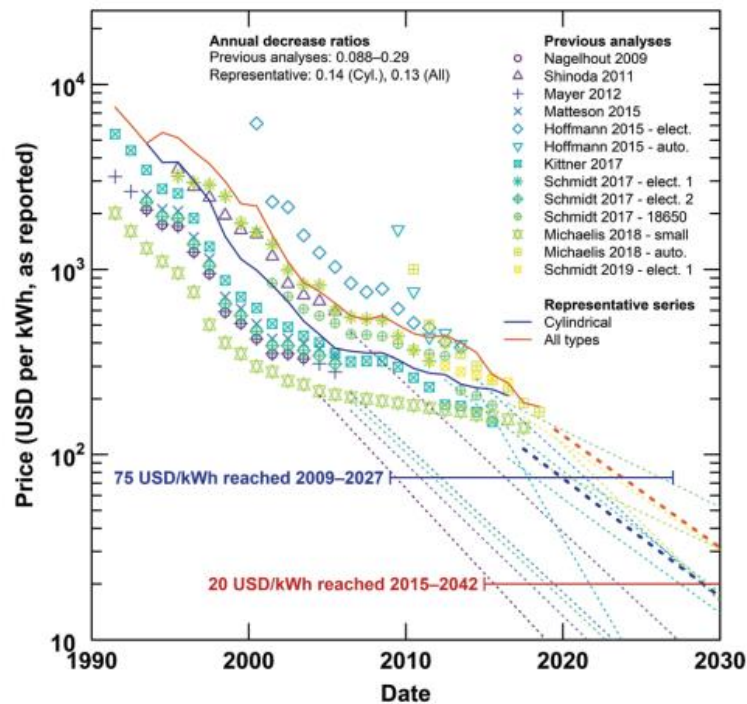


Figure 27 - Evolution du prix d'une pile au lithium depuis 1990 et projections jusqu'en 2030 (Source : Ziegler et Trancik, 2021)

Si le coût à l'achat d'un véhicule électrique reste aujourd'hui important par rapport à celui d'une voiture thermique, un rapport de BloombergNEF commandé par la Fédération Européenne pour le Transport et l'Environnement projette que les voitures électriques deviendront moins chères que leurs équivalentes thermiques avant 2030(115). Le prix de l'électricité étant bien inférieure à celui d'un produit pétrolier certainement amené à augmenter, le prix à l'usage d'une voiture électrique est également bien plus avantageux que celui d'une voiture thermique. Cette technologie devrait donc devenir abordable à court-terme pour un usage individuel.

Il reste à savoir quelle augmentation de la production d'électricité sera nécessaire afin d'alimenter le parc de voitures électriques. Selon les statistiques françaises, en 2021 étaient en circulation dans le pays 38,3 millions de voitures particulières et 5,9 millions de véhicules utilitaires légers(116). Or, cette année seules 300 000 véhicules électriques, incluant les véhicules hybrides, étaient immatriculés en France(117). Le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français RTE a publié un rapport en 2017 projetant l'évolution du parc de véhicules électriques en France à horizon 2035(118). L'estimation haute prévoit 16 millions

de véhicules électriques pour une surconsommation d'électricité de 34 TWh soit 8% de la production actuelle du réseau électrique. Si l'ensemble des voitures particulières et véhicules utilitaires légers étaient remplacés (44,2 millions de véhicule), la surconsommation serait d'environ 94 TWh soit 22% de la production actuelle. Le rapport de RTE suggère qu'une augmentation de 8% de la consommation d'ici 2035 devrait être aisément absorbée. En revanche, dans l'hypothèse d'une substitution complète de la mobilité légère par des véhicules électriques une augmentation de 22% paraît plus difficile à mettre en œuvre sans toutefois se situer dans un ordre de grandeur inatteignable.

Enfin, l'une des questions soulevées par la mobilité électrique est la disponibilité en matières premières. En effet, les batteries des véhicules électriques font appel à des métaux présents en quantité potentiellement peu abondante sur Terre (lithium, nickel, cobalt et manganèse principalement) et, à l'instar du pétrole, la question de savoir si les réserves sont capables d'approvisionner la production de batteries sur le temps long se pose(119). Si les recherches récentes semblent conclure que le lithium, le nickel et le manganèse ne devraient pas poser de problème d'approvisionnement à moyen terme dans l'essor de la production de véhicules électriques(120, 120, 121), le cas du cobalt semble plus complexe. L'étude de Fu *et al.* de 2020 estime que la demande mondiale de Cobalt, actuellement destinée à 53% pour les batteries, varierait en 2030 de 235 à 430 kilotonnes soit 160% à 280% des capacités de production de 2016, l'estimation haute reposant sur le scénario principal de l'AIE impliquant une transition importante vers les véhicules électriques(122). L'article projette une mise en tension de l'approvisionnement en cobalt pour ce scénario, avec la demande incluse dans la barre d'erreur de la production estimée pour 2030 (Figure 28). De plus la production provient actuellement à 63% d'un seul pays (République Démocratique du Congo), et bien que cette part soit supposée descendre autour de 40% en 2030, cela rend la production et la disponibilité de cobalt vulnérables à des enjeux géopolitiques. Les réserves ultimes récupérables globales estimées serait de 6,9 millions de tonnes, soit 16 années seulement de la production haute de 2030(123, p. 22-24). Cependant contrairement au pétrole, le cobalt est au début de son ère d'extraction et il semble que de nombreuses découvertes restent encore à faire, nécessitant plus de recherche dans ce domaine pour gommer l'incertitude quant aux réserves ultimes(124).

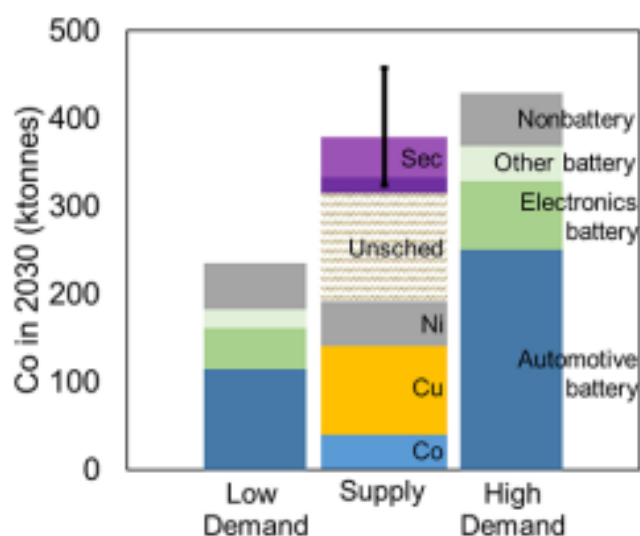


Figure 28 - Comparaison de la demande en cobalt par usage avec l'approvisionnement de cobalt par source de production en 2030 (Source : Fu *et al.*, 2020)

Ainsi, le déploiement de la voiture électrique semble être une alternative prometteuse aux voitures thermiques dans le cadre de la mobilité légère malgré certaines difficultés. La plus importante d'entre elle semble être la contrainte d'approvisionnement en cobalt qui risque de ne pas croître de manière adéquate avec la demande de production de batteries, limitant les capacités de remplacement du parc automobile. La voiture électrique pourrait cependant jouer un rôle salvateur dans la mitigation des pénuries de pétrole et remplacer substantiellement son rôle dans les déplacements dans le cadre d'une activité vétérinaire.

2.3.1.2. Autres carburants alternatifs

D'autres technologies ont bien sûr été évoquées afin de remplacer les produits pétroliers comme carburant des transports. Certaines, telle que la voiture à propulsion nucléaire, ne peuvent à l'heure actuelle pas être considérées autrement que comme des gadgets marginaux faute de publications scientifiques en soutenant la pertinence. En revanche, le développement des véhicules à pile à combustible (VPC), véhicules électriques dont l'électricité est produite par une pile à combustible interne au véhicule, contribue à un regain d'intérêt pour l'utilisation de l'hydrogène (plus exactement du dihydrogène H₂) comme combustible en raison de son absence d'émission de CO₂ à l'usage et de son potentiel de substitution aux produits pétroliers(125).

Si l'hydrogène est le combustible actuellement majoritairement utilisé par les VPC, le rapport de l'AIE sur le futur de l'hydrogène de 2019 remet son rôle en perspective(104). En effet son intérêt est principalement industriel dans un enjeu de changement climatique car sa production se fait à 99,3% à partir de sources d'énergie fossiles (gaz naturel majoritairement). Son usage est quasi-exclusivement industriel, actuellement moins de 0,01 Mt sur les 70 Mt de dihydrogène pur produits mondialement est destinée aux VPC. Moins de 12 000 VPC sont actuellement en circulation dans le monde alors que la flotte de voitures devrait croître jusqu'à plus d'un milliard six cents millions de véhicules en 2030 avec une infrastructure nécessaire au ravitaillement d'hydrogène quasi inexistante. En effet l'hydrogène est un gaz délicat à transporter et à stocker, la densité énergétique du dihydrogène compressé est environ sept fois inférieure à celle de l'essence. Enfin, si le prix pour un VPC est encore élevé, avec le développement de la technologie il devrait à long terme devenir comparable à celui d'une voiture électrique à batterie mais uniquement pour un rayon d'action important, supérieur à 400km. Pour de telles distances son autonomie lui donne un avantage certain sur la voiture électrique à batterie. Il semblerait que l'utilisation de VPC fonctionnant à l'hydrogène puisse avoir un intérêt relatif dans la mobilité lourde, de fret ou de transports publics, avec une implémentation à plutôt long-terme, mais que son intérêt dans la mobilité légère concernant les déplacements quotidiens d'une clinique vétérinaire soit très faible et inférieur à ce qu'offrirait l'usage de la voiture électrique à batterie.

2.3.1.3. Utilisation des biocarburants

L'usage des biocarburants, issus de la biomasse, est parfois également avancé comme une alternative aux produits pétroliers pour les transports et de nombreux gouvernements promeuvent leur production(126). Ils représentaient 3% des carburants utilisés dans les transports en 2018 et leur production devrait continuer à croître dans le monde selon l'AIE (127). Les deux principaux types de biocarburants sont le bioéthanol et le biodiesel, produits à partir de la biomasse. Le bioéthanol est produit via la fermentation de sucres végétaux, généralement à partir de maïs ou de canne à sucre principalement au Brésil ou aux Etats-Unis(128), tandis que le biodiesel est produit par transestérification à partir d'huiles végétales ou de graisses animales(129). Ces carburants peuvent être produits rapidement, être utilisés

dans les moteurs thermiques habituels et sont peu polluants(130). Ces caractéristiques font qu'ils sont souvent avancés comme étant une solution pertinente et renouvelable à la fois au problème du changement climatique et à celui de la dépendance des transports au pétrole. Cependant, la majorité des biocarburants, dits de première génération, sont produits à partir de cultures comestibles ou de terres arables. Il se pose alors la question de la compétition entre l'allocation de la biomasse pour l'alimentation humaine ou pour la production de carburant.

Le bioéthanol représente 75% des biocarburants mondiaux et les Etats-Unis et le Brésil produisaient en 2015 86% de la production mondiale de bioéthanol tandis que l'Union Européenne est le plus grand producteur de biodiesel(131). En 2013-2014, 43,9% de la production de maïs aux Etats-Unis et 54,5% de la production de canne à sucre au Brésil était destinée à la production de bioéthanol tandis que 59,1% de la production d'huile de colza de l'Union Européenne était destinée à la production de biodiesel. De nombreux auteurs craignent que la production de biocarburants à grande échelle ne favorise une importante insécurité alimentaire en raison du volume de cultures nécessaire pour augmenter significativement leur part parmi les carburants des transports(126, 131–133). Les biocarburants de première génération comme source de carburant alternatif pour les transports ne semble alors pas être une solution soutenable pour substituer le pétrole dans ce secteur à une quelconque échelle comparable à son activité actuelle.

La production de biocarburants de deuxième génération, c'est-à-dire produits à partir de la biomasse résiduelle non comestible, peut être une alternative intéressante mais pose un certain nombre de problèmes techniques(129, 134). Le cas des biocarburants et de l'usage de la biomasse résiduelle dans le cadre de l'agriculture sera étudié de manière approfondie au paragraphe 4.

2.3.2. Réflexion d'échelle et impact climatique

Les alternatives précédemment décrites peuvent avoir un rôle à jouer à court terme dans l'atténuation des effets du déclin de l'approvisionnement en pétrole et à long terme dans l'émergence d'une nouvelle organisation des transports moins dépendante du pétrole. Cependant il est nécessaire de prendre conscience de l'ordre de grandeur du nombre de véhicules à remplacer.

Pour la mobilité légère uniquement, l'AIE dénombre environ un milliard et cent millions de véhicules en 2019 dans le monde et prévoit une hausse de ce chiffre jusqu'à plus d'un milliard six cents millions de véhicules en 2030, soit une croissance de plus de 45%. La mobilité lourde routière (camion de fret et bus) représente environ 220 millions de véhicules en 2019 et l'AIE prévoit 280 millions de véhicules en 2030, une croissance de plus de 25%(104). Il semble peu probable que la croissance de la demande en véhicules cesse dans la décennie suivante. Il faut ajouter à cela environ 2,1 millions de navires marchands en 2021(135) .

Or en 2021 seuls 16 millions de VEB légers étaient en circulation dans le monde ce qui représente environ 1,5% du parc automobile, et 0,1% des camions de fret étaient électrifiés. Le taux d'électrification des transports est actuellement très bas et l'électrification des véhicules lourds comme les camions routiers est plus difficile à mettre en place en raison de la puissance nécessaire aux batteries et de leur autonomie limitée de telle sorte que seule l'hybridation semble pratiquement envisageable pour ces véhicules(136).

Par ailleurs, en assumant le remplacement de l'ensemble des véhicules intervenant dans la mobilité légère par des véhicules électriques la demande mondiale d'électricité augmenterait fortement. Cette augmentation serait de 22% en France mais l'extension de ce chiffre à l'échelle globale est très discutable. Or, si l'électricité française est très peu émettrice de CO₂

en raison de la forte part de l'énergie nucléaire dans le pays (55gCO₂/KWh : figure 29(137)), la production d'électricité dans le monde se fait majoritairement à partir de combustion d'énergie fossile émettant du CO₂, pour une émission moyenne globale d'environ 520gCO₂/KWh en 2013(138). L'électrification du parc automobile sans remplacement des sources de production d'électricité par des énergies renouvelables ou de l'énergie nucléaire entraînerait une très forte hausse des émissions du secteur ce qui ne semble pas être une solution enviable dans un contexte de changement climatique. Cette considération est faite sans compter l'électrification potentielle de la mobilité lourde.

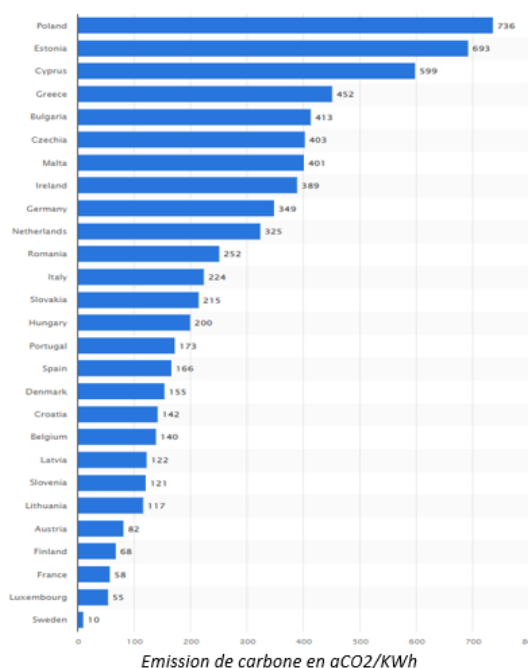


Figure 29 - Emissions de CO₂ par KWh produit des pays européens en 2021 (Source : D'après [statista.com](https://www.statista.com), consulté le 21/07/2022)

Pour cette dernière, l'usage de carburant à base d'hydrogène est une éventualité mais là aussi, la production d'hydrogène est très émettrice de carbone sauf si l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau à partir d'une électricité décarbonée, ce qui pose le même problème que précédemment avec une technologie dont l'implémentation est encore presque inexistante(104). A horizon 2050, un scénario optimiste de l'AIE assumant que les engagements politiques sur le climat soient respectés prévoit qu'un carburant à base d'hydrogène décarboné puisse compter pour seulement 5% du carburant utilisé dans l'aviation et pour 12% du carburant utilisé dans la marine(57).

Les émissions ici envisagées ne prennent pas en compte toutes les émissions intrinsèques à la fabrication de nouveaux véhicules, à l'implémentation des nouvelles infrastructures et au traitement des millions de véhicules remplacés.

En conclusion, il semble que différents vecteurs d'énergie soient amenés à supplanter les produits pétroliers pour faire fonctionner le secteur des transports. Parmi ceux-ci, les batteries électriques semblent avoir le plus de potentiel. Dans le scénario où les engagements politiques sont respectés l'AIE anticipe que 250 millions de véhicules électriques seront en circulation en 2030, avec une très forte croissance de ce secteur(139). Si cette tendance se maintient la décennie suivante une part substantielle bien qu'incomplète des transports de mobilité légère à rayon d'action moyen pris en charge par les véhicules thermiques devrait avoir été substituée par des véhicules moins vulnérables au déclin du pétrole. Le maintien de cette

tendance au-delà de 2030 est toutefois assez incertaine compte tenu des tensions potentielles sur la production d'électricité, de la capacité des chaînes de production à répondre à la demande de véhicules électriques, et des tensions sur l'approvisionnement de certains métaux comme le cobalt. De plus le transport de marchandises, s'appuyant sur des véhicules lourds semble plus difficile à transformer à moyen et long-terme. Pour l'ensemble des transports et en particulier pour la mobilité lourde, il paraît improbable que le volume des transports et la quantité de véhicules actuellement en circulation puisse être conservés à la suite du pic pétrolier, engendrant une contraction dans ce secteur, plus marquée pour la mobilité lourde que la mobilité légère.

2.3.3. Optimisation des déplacements au sein d'une clinique

Il semble qu'en France à relativement court terme la transition de la mobilité légère basée sur des produits pétroliers à un parc de voitures électriques soit suffisante pour que les déplacements professionnels d'une clinique vétérinaire soient faiblement impactés. Il paraît acceptable que les quelques véhicules d'une clinique à activité ambulatoire deviennent électriques et disposent d'une ou plusieurs bornes de recharge au sein de la structure. Ceci suggère des coûts d'investissement mais il a été décrit que le prix global d'un véhicule électrique, en particulier pour un volume kilométrique important, est amené à devenir plus avantageux que celui d'un véhicule thermique. Une certaine logistique devra être mise en place selon l'activité afin de s'assurer que suffisamment de véhicules aient suffisamment d'autonomie à tout instant, la recharge prenant plus de temps qu'un passage à la pompe à essence.

Les déplacements quotidiens des travailleurs et de la clientèle en revanche, en particulier dans le cadre d'une pratique canine, risquent d'être impactés. Selon l'estimation haute de RTE, en 2035 le nombre de voitures électriques en France se portera au mieux à 16 millions et représentera moins de 40% du parc automobile actuel(118), date à laquelle la décrue de l'approvisionnement de pétrole en Europe devrait déjà s'infléchir. Les trajectoires intermédiaires, plus probables, vont de 6 à 8 millions de véhicules seulement (Figure 30). De 60% à 80% des utilisateurs au minimum seront alors toujours dépendants d'un carburant pétrolier devenant de plus en plus coûteux avec risques de pénuries.

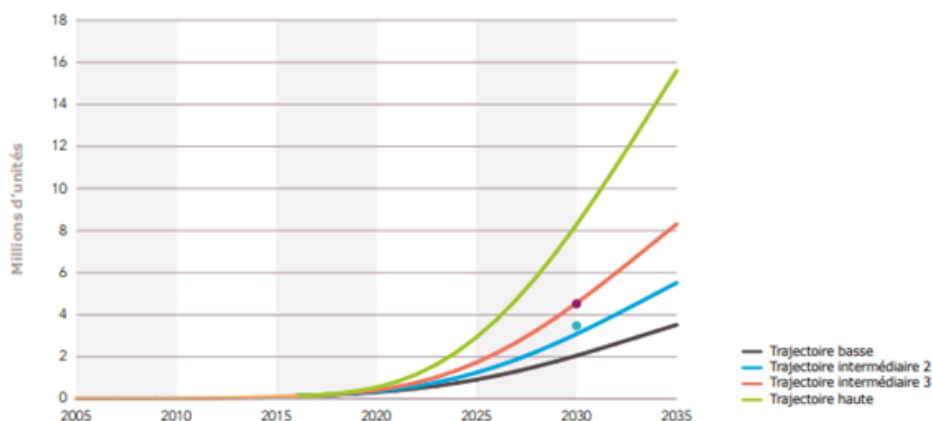


Figure 30 - Projection du nombre de véhicules électriques et hybrides jusqu'en 2035 en France (Source : D'après RTE, 2017)

Les utilisateurs de voiture électrique devraient être inégalement répartis entre milieu urbain et rural. En milieu rural, la mise en place de la voiture électrique est rendue plus aisée par la place au sol et les kilomètres parcourus qui la rendent plus attractive qu'en milieu urbain. La fraction des individus qui n'en disposeront pas subiront en revanche des

conséquences plus importantes sur le coût de leurs trajets, plus longs, et auront une accessibilité moindre aux services de transports en commun que leurs homologues urbains.

Afin d'amortir ces difficultés de déplacements, les cliniques vétérinaires peuvent mettre en place des stratégies afin d'optimiser les déplacements et réduire la quantité de transports nécessaires à son activité et leur dépendance au pétrole. A court terme, afin d'anticiper les premières ruptures d'approvisionnement de pétrole et en rejoignant les recommandations faites dans les articles de Frumkin *et al.* et de Hess *et al.* concernant la santé humaine(97, 102), cela signifie électrifier les véhicules professionnels suffisamment tôt, prévoir des logements sur place pour certains travailleurs et planifier l'activité de sorte à réduire les déplacements au maximum. Le covoiturage pour les travailleurs de la clinique devrait être systématisé lorsque c'est possible, la structure pourrait encourager l'usage des transports en commun en fournissant un abonnement à ses travailleurs(96) ou mettre à disposition des vélos électriques pour un transport rapide et économe, notamment en milieu urbain. La gestion des stocks devrait être optimisée afin de réduire la fréquence des livraisons.

Les déplacements de la clientèle, impliquant le transport d'un animal à l'état clinique potentiellement dégradé, semblent difficilement pouvoir être pris en charge par les transports publics ou par du covoiturage. Diverses solutions peuvent cependant être envisagées afin de minimiser les déplacements nécessaires aux soins et au suivi des animaux. En premier lieu un triage rigoureux permet d'éviter certains déplacements inutiles, ce triage peut se faire en amont par un effort d'éducation envers les propriétaires afin qu'ils reconnaissent correctement les signes d'alerte d'affection de leur animal. En médecine humaine, il est suggéré que les médicaments puissent être délivrés par le médecin directement afin d'éviter un déplacement supplémentaire à la pharmacie(102). Il a en effet été montré qu'en milieu rural, où la pharmacie peut être considérablement éloignée de la structure de soin, la possibilité d'avoir sa prescription délivrée par le médecin économise du temps et de l'argent au patient et réduit considérablement les trajets nécessaires à la prise en charge médicale(140). Dans un contexte de contraction de l'approvisionnement en pétrole c'est un argument en défaveur du découplage prescription-délivrance dans la pratique vétérinaire.

Une bonne pratique de la médecine préventive semble également être pertinente afin de diminuer les trajets. La médecine de troupeaux en particulier permet de prévenir des épidémies et une visite à visée prophylactique permet d'éviter de nombreux déplacements ultérieurs pour des soins individuels. Pourtant, il a été montré au Royaume-Uni que la médecine préventive n'est mise en œuvre que jusqu'à un point « optimal » au-delà duquel le coût de la prévention dépasse le coût de la gestion des pathologies(141). Les nouvelles contraintes de ressources à venir pourraient rendre nécessaire de pousser la pratique de la médecine préventive plus loin, voire de la rendre plus économique. Pour les animaux de compagnie ou de loisir en revanche, la médecine préventive d'un individu (vaccination, traitement antiparasitaire...) nécessite beaucoup de trajets au cours de sa vie, en particulier pour les rappels vaccinaux et la prescription de traitements antiparasitaires, qui ne seraient pas nécessairement aussi nombreux si l'animal n'était vu que pour la prise en charge d'une affection déclarée. Dans ce cadre-là, afin de réduire le nombre de déplacements nécessaires à la bonne prévention de ces animaux, un planning vaccinal optimal devrait être réalisé, en groupant les vaccinations, en exploitant l'ensemble de la durée d'efficacité prouvée des valences vaccinales et en adaptant la prophylaxie aux stricts besoins de l'animal. Le plus possible, les traitements antiparasitaires devraient être délivrés pour une longue période en une fois, éventuellement en privilégiant les formes nécessitant moins de renouvellements afin d'éviter des allers-retours réguliers pour renouveler le traitement de l'animal.

2.3.4. Mise en place de nouvelles pratiques vétérinaires

La télémédecine est définie en médecine humaine comme l'utilisation de réseaux de communication afin d'assurer des services de santé ou d'éducation médicale d'une situation géographique à une autre afin de répondre à des difficultés de répartition inégale ou de pénurie de ressources humaine ou d'infrastructure(142). Son usage s'est révélé très utile dans la gestion de la crise du Covid-19 alors que les déplacements étaient réduits pour des raisons sanitaires(143) et la télémédecine apparaît alors pertinente afin de réduire les déplacements de la clientèle d'une clinique vétérinaire à la suite du pic pétrolier. Il s'agit d'une mesure suggérée afin d'améliorer la soutenabilité dans le domaine vétérinaire(96). Il se pose cependant la question des limites de la qualité de la prise en charge ainsi proposée. Une étude britannique de O'Cathail *et al.* a passé en revue l'ensemble des publications jusqu'en 2018 incluant l'usage de téléconsultation vidéo dans les structures de soin du Royaume-Uni(142). Il en ressort un haut niveau de satisfaction quant à cette méthode de consultation, qui est tout de même jugée de qualité inférieure à une consultation en face à face classique. Malgré l'absence d'examen clinique physique, le diagnostic à distance se révèle fiable dans plusieurs spécialités : En neurologie et pour les accidents et urgences il n'y a pas de différence significative de diagnostic entre une téléconsultation et une consultation classique. Pour des spécialités comme l'ophtalmologie ou la rhumatologie l'étude montre une bonne fiabilité dans les diagnostics des affections simples. Une partie importante des accidents mineurs gérés par téléconsultation a pu être prise en charge localement par le patient. Les difficultés techniques, telle qu'une mauvaise qualité vidéo, peuvent cependant dégrader la qualité du diagnostic comme le rapportent 46% des dermatologistes d'une des études analysées. Il apparaît que bien que lors d'une première téléconsultation avec un praticien inconnu les patients éprouvent plus de gêne et un manque de confiance, ils semblent paradoxalement s'ouvrir plus et posent plus facilement des questions. Il est suggéré que ce type de consultation est plus approprié pour les consultations de suivi. L'une des études concernant 2000 patients rapporte qu'une téléconsultation entraîne moins d'examens complémentaires qu'une consultation classique mais plus de consultations de suivi.

Dans le cadre de la médecine vétérinaire, l'établissement d'un diagnostic par téléconsultation paraît plus difficile, notamment en raison de l'importance de l'examen clinique de l'animal, de la difficulté éventuelle à le manipuler ou à le présenter à une caméra par un propriétaire seul et des capacités de ce dernier à interpréter les signes que son animal manifeste. Dans ce cadre, une téléconsultation semble bien plus appropriée pour les petits animaux que pour les grands. Cependant un certain nombre d'affections mineures devraient pouvoir être diagnostiquées à distance et une téléconsultation vétérinaire pourrait permettre de déterminer si l'animal a réellement besoin de se rendre à la clinique pour des examens complémentaires ou faire office de consultation de suivi. Se pose également le problème de la délivrance de médicaments, si ceux-ci sont nécessaires, qui ne peut pas être réalisée au cours d'une téléconsultation. Une étude de Roca et McCarthy (2019) rapporte que les bienfaits et limites des téléconsultations en médecine vétérinaire n'ont pas encore été évalués et questionne 398 propriétaires ayant suivi une téléconsultation(144). Ils observent que 60% des téléconsultations ont mené à recommander une consultation en face à face avec un vétérinaire traitant qui a été réalisée dans 68,8% des cas (près de 60% des cas de refus sont dus à des raisons financières). Il semble alors que la téléconsultation a légitimement permis d'éviter un déplacement dans 40% des cas. Les participants de cette étude ont été recrutés sur un site proposant des services de télémédecine ce qui engendre un biais de sélection, les participants manifestant déjà une aisance avec les nouvelles technologies et une confiance initiale dans la télémédecine. Lors de la consultation en face à face, le vétérinaire est en accord avec les recommandations faites lors de la téléconsultation dans 82,4% des cas. Dans cette

étude le service de téléconsultation est différent du service vétérinaire traditionnel, et l'on peut supposer qu'une clinique pourvoyant les deux types de consultation permettrait un suivi d'autant plus cohérent. 91,9% des interrogés faisant appel à un vétérinaire traditionnel déclarent qu'ils accepteraient un service de téléconsultation de sa part. Il est évident que tous les motifs de consultation ne se prêtent pas à une téléconsultation en première intention et un triage téléphonique correct devrait permettre d'optimiser son usage.

En termes de coût, les études en médecine humaine montrent que celui-ci est systématiquement supérieur pour la structure médicale que pour une consultation normale en raison de l'investissement technologique(142). Celui-ci s'est cependant considérablement réduit avec le temps. Pour les patients, certaines études montrent une réduction du coût de leur prise en charge et d'autres une augmentation. Quoi qu'il en soit ils sont épargnés du coût et du temps du trajet, bénéficient d'une meilleure flexibilité dans les rendez-vous et ont un accès plus facile aux spécialistes. Ces avantages sont pertinents dans l'optique d'une réduction de la dépendance aux transports de la pratique vétérinaire.

Une dernière solution afin de compenser le manque d'accès aux transports de la clientèle vétérinaire serait de développer la médecine ambulatoire dans la pratique canine, notamment dans un contexte d'urgence, afin de mettre à disposition des propriétaires les véhicules électriques qu'une structure vétérinaire pourra plus facilement se permettre de mettre en circulation.

2.3.5. Evolution du modèle structurel du maillage vétérinaire français

Une thèse d'exercice vétérinaire sur la caractérisation des déserts médicaux vétérinaires en France de 2021 explique que le concept de désert médical vétérinaire n'a pas de définition consensuelle mais peut être caractérisé par un défaut d'accessibilité aux soins, services ou compétences vétérinaires au sein d'une région donnée. L'accessibilité peut être contrainte par des causes spatiales, temporelles, physiques ou culturelles(145). L'augmentation du coût et des difficultés de déplacement est amenée à dégrader plusieurs de ces accessibilités et donc à aggraver ce phénomène déjà existant en France, en Europe et dans au moins plusieurs pays développés du monde comme les Etats-Unis ou le Japon.

Ce travail rapporte qu'en France il semble y avoir une bonne adéquation entre l'offre et la demande de soins vétérinaires pour les petits animaux. Comme vu précédemment, le déclin d'approvisionnement en pétrole est susceptible de rompre cet équilibre, en particulier en zones rurales où la clientèle canine est en forte expansion et est responsable de la majorité de la croissance d'activité des cliniques vétérinaires de ces régions. La situation est cependant plus critique pour la pratique vétérinaire à destination des animaux de rente. Le projet VeTerrA a établi que 29% des bassins de vie français ont une disponibilité insuffisante aux soins vétérinaires pour les animaux de rente en 2014, qualifiée de très faible à plutôt faible. 35% ont une disponibilité qualifiée de moyenne et donc susceptible d'être rapidement déclassée en cas de facteur dégradant l'accessibilité aux soins(146). Cette disponibilité est calculée en fonction de la distance à une clinique vétérinaire, du nombre de vétérinaires rapporté au nombre d'exploitation agricole et d'un indicateur mathématique évaluant l'adéquation offre-demande en service vétérinaire. Les résultats sont présentés sur la carte de la figure 31.

Cette désertification s'explique par la concentration des cheptels bovins dans un nombre réduit d'exploitation, le cheptel moyen d'une exploitation étant en hausse alors que le cheptel national se réduit, la réduction et le vieillissement des vétérinaires déclarant une pratique rurale ainsi que l'augmentation de la taille des cliniques vétérinaires, qui concentre l'offre de soins et voit disparaître un certain nombre de pratiques rurales de petite taille assurant un

maillage plus étroit(145). Sont soulevés par ce phénomène un risque important de rupture du maillage sanitaire à plus ou moins court terme, un risque socio-économique pour les éleveurs coupés des services vétérinaires et des conséquences sur l'accès aux soins des animaux et le bien-être animal.

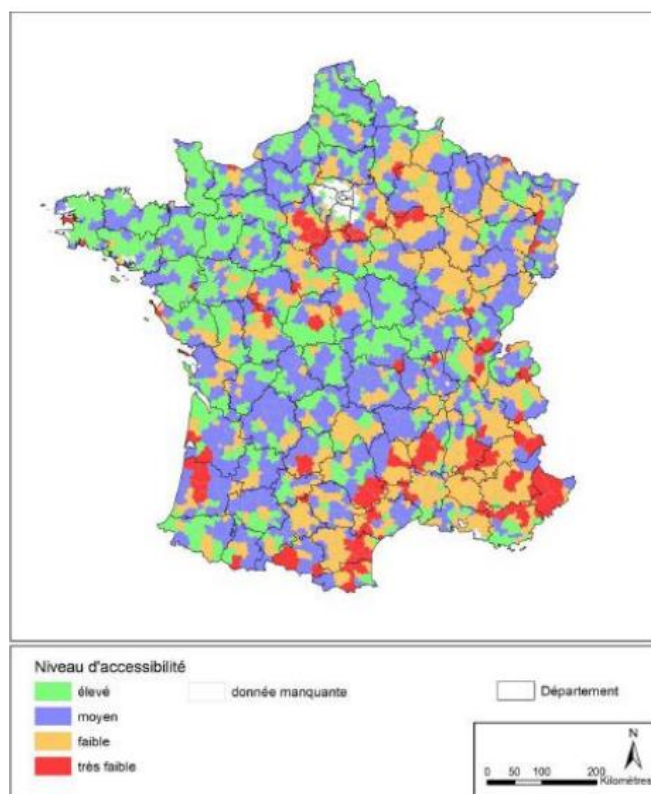


Figure 31 - Répartition spatiale du niveau d'accessibilité de l'offre vétérinaire à destination des animaux de rente en 2014 en France (Source : D'après Gouttenoire et al., 2015)

La hausse brutale et constante du prix et de la difficulté des déplacements risque d'aggraver la désertification vétérinaire en milieu rural, bien que l'usage professionnel de la voiture électrique à batterie réduise cette vulnérabilité. Il convient d'autant plus de faire évoluer le modèle du maillage vétérinaire français. La thèse de 2021 rapporte que les solutions mises en œuvre actuellement afin de compenser le déficit de vétérinaires ruraux (augmentation du *numerus clausus*, voies de recrutement privilégiées) montrent peu d'efficacité ou sont très controversées au sein de la profession. De nouveaux axes d'évolution devraient être envisagés en commençant par une meilleure étude et une meilleure caractérisation des déserts médicaux vétérinaires comme cela a été réalisé en médecine humaine. Des incitations économiques à la déconcentration des structures vétérinaires seraient pertinentes afin de mieux répartir l'offre de soin. Le conventionnement vétérinaire-éleveur tel que pratiqué depuis 40 ans en Auvergne Rhône-Alpes est qualifié de solution efficace et vertueuse dont l'extension appuyée par les pouvoirs publics permettrait d'assurer les soins vétérinaires en régions en voie de désertification. Enfin, la prise en charge de l'assurance des soins vétérinaires dans un contexte de crise pourrait être envisagée au niveau national, avec des vétérinaires employés par l'état afin d'assurer un service public de soins vétérinaires comme c'est pratiqué en Roumanie. De manière similaire, en Finlande certains vétérinaires ayant une pratique libérale sont engagés par les collectivités territoriales afin d'assurer un maillage territorial satisfaisant même dans des régions aussi reculées que la Laponie(145). Une telle planification du maillage vétérinaire nécessiterait soit une forte incitation économique dirigée prise en charge par le secteur public ou un principe de roulement obligatoire des vétérinaires français dans la charge d'assurer des missions de maintien du maillage sanitaire.

3. Impact du pic pétrolier sur la dépendance directe de la pratique vétérinaire à l'industrie pétrochimique

3.1. Importance des produits pétrochimiques dans le secteur médical

3.1.1. L'industrie pétrochimique

La pétrochimie consiste en l'ensemble des techniques permettant la production de composés chimiques de synthèse à partir de pétrole ou de gaz naturel. Sont ainsi produits majoritairement par cette industrie des engrais de synthèse utilisés dans l'agriculture, des médicaments, l'ensemble des matières plastiques mais aussi toutes sortes de solvants, détergents et cosmétiques de synthèse. Comme le rappelle l'AIE dans son analyse sur le futur des produits pétrochimiques de 2018, notre société est très dépendante de ces produits tant pour le rôle des engrais dans la productivité de l'agriculture que des produits plastiques omniprésents dans l'ensemble des biens de consommation courante(64). Il s'agit du deuxième secteur le plus consommateur de pétrole et il accapare 14% de sa production et 30% des besoins en énergie de l'ensemble du secteur industriel.

L'importance des engrais dans l'agriculture sera abordée ultérieurement mais les produits pétrochimiques, en particulier les médicaments et les produits issus de la plasturgie sont couramment et abondamment utilisés dans le secteur médical et vétérinaire.

3.1.2. Intérêt et usages des matériaux dérivés de l'industrie plasturgique dans le secteur médical

Au sein de la pétrochimie, un produit issu du raffinage du pétrole, généralement du naphta, est transformé par vapocraquage en produits chimiques légers tels que l'éthylène ou le propylène et des produits aromatiques tels que le benzène. La plasturgie consiste ensuite à polymériser et donner forme à toutes sortes de matériaux plastiques comme le PVC ou le polyéthylène. Ces matériaux sont abondamment utilisés dans le matériel médical consommable et leurs emballages : les seringues, les cathéters, les poches à perfusions et tubulures, les gants jetables etc. A cette liste s'ajoutent les textiles synthétiques comme les tenues chirurgicales, les champs opératoires, les alèses ainsi que tout le matériel de plus grande envergure nécessitant des plastiques (scialytiques, tables, stéthoscopes...) et produits d'hygiène et d'entretien(102).

Les matériaux plastiques sont bon marché, s'adaptent à toutes sortes d'usages et peuvent être produits en volume important. Ils permettent une excellente hygiène en étant aisément nettoyables et en constituant des emballages conservant la stérilité du matériel. Ils sont plus solides et sécuritaires que d'autres matériaux historiques comme le verre ou la céramique et ont ainsi largement supplanté ces derniers en quelques décennies(147, 148).

Il est cependant difficile d'évaluer quantitativement l'utilisation des plastiques en secteur médical, et à fortiori en secteur vétérinaire. L'Organisation Non Gouvernementale (ONG) Health Care Without Harm (HCWH) a mené une enquête dans 5 hôpitaux européens afin d'évaluer leur consommation de plastique(149). L'un d'entre eux a produit une analyse détaillée des plastiques utilisés avec des données préalables à la surconsommation lors de la crise du Covid-19 : 60% de sa consommation de plastique annuelle est répartie dans les produits présentés à la figure 32. Les 40% restant correspondent principalement à de la consommation non médicale en lien avec l'alimentation des patients et il semble peu pertinent de les transposer à la pratique vétérinaire. En moyenne sur 4 hôpitaux, 62,3% de la masse des déchets sanitaires de l'hôpital étaient des matières plastiques.

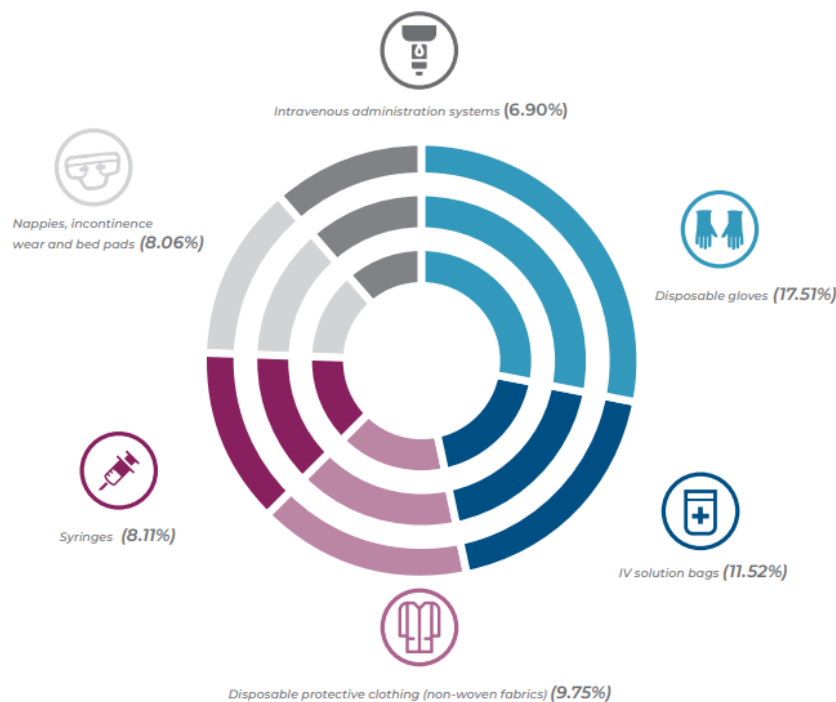


Figure 32 - Part de la consommation de plastique d'un hôpital européen par produit (Source : D'après Gamba et al., 2021)

Il s'agit de la seule tentative d'évaluation des postes de consommation de plastique dans le secteur médical dénichée en Europe et ne peut ainsi que donner une idée de celle-ci et de l'intensité de la consommation de plastique en secteur médical en attendant des évaluations plus systématiques et poussées. Si le profil de consommation d'une structure vétérinaire ne saurait être équivalent à celui d'un hôpital, il semble que des rapprochements puissent être faits, notamment avec des structures dédiées aux petits-animaux. L'utilisation de matériel plastique, souvent jetable, est également omniprésent dans la médecine vétérinaire et actuellement nécessaire au bon déroulé des soins. Une thèse vétérinaire de 2016 rapporte en effet qu'un vétérinaire produit en moyenne 5kg de déchets plastiques par mois(150).

3.1.3. Utilisation de médicaments

En médecine vétérinaire tout comme en médecine humaine, un large panel de médicaments sont utilisés à des fins thérapeutiques ou prophylactiques. Le développement de nouveaux médicaments a historiquement permis de considérablement améliorer la qualité des soins apportés aux animaux et les performances techniques des animaux de production(151). L'ensemble des médicaments anti-microbiens peuvent être cités (antibiotiques, antiparasitaires, antifongiques) mais également les anti-inflammatoires stéroïdiens et non stéroïdiens, les anesthésiques et de nombreuses autres classes de molécules(152). Economiquement, la vente de médicaments représente une part importante des revenus des structures vétérinaires en France, elle représente généralement la moitié du chiffre d'affaires d'une activité rurale(153).

Selon Hess *et al.*, 3% du pétrole est investi dans la production de produits pharmaceutiques mais 99% de ceux-ci sont dérivés du pétrole(97). Leur production dépend ainsi quasi exclusivement de l'industrie pétrochimique, sans compter la production des emballages plastiques, des capsules, des tablettes qui les accompagnent(102).

3.2. Vulnérabilité de l'industrie pétrochimique au pic pétrolier

3.2.1. Dépendance à la ressource pétrole

Par définition l'industrie pétrochimique est dépendante au pétrole. En effet, le pétrole et le gaz naturel sont utilisés comme réactifs premiers dans de nombreux processus chimiques et produisent par ailleurs la chaleur nécessaire à ces mêmes processus. Il s'agit donc d'un secteur qui utilise le pétrole à la fois comme matière première et source d'énergie, la part de la matière première comptant pour près de 60% de l'énergie globale apportée. C'est le deuxième secteur le plus consommateur de pétrole (14% de la production de pétrole et 8% de la production de gaz naturel y sont allouées) et c'est l'industrie la plus consommatrice d'énergie devant la métallurgie et la production de ciment(64).

Outre le fait que la production mondiale de gaz naturel est amenée à subir le même phénomène de pic que le pétrole, ce qui dépasse le cadre de ce travail, avec une moins bonne plasticité de son usage en raison des difficultés à le transporter, il n'est pas concevable d'imaginer qu'il puisse remplacer le pétrole comme matière première pour l'industrie pétrochimique car ces deux matières premières ne permettent pas la production des mêmes produits. 90% du pétrole utilisé dans l'industrie permet de produire les « High Value Chemicals » (HVCs), réactifs premiers permettant ensuite la synthèse de plastiques et de médicaments tandis que le gaz naturel permet de produire principalement de l'ammonium et du méthanol (Figure 33).

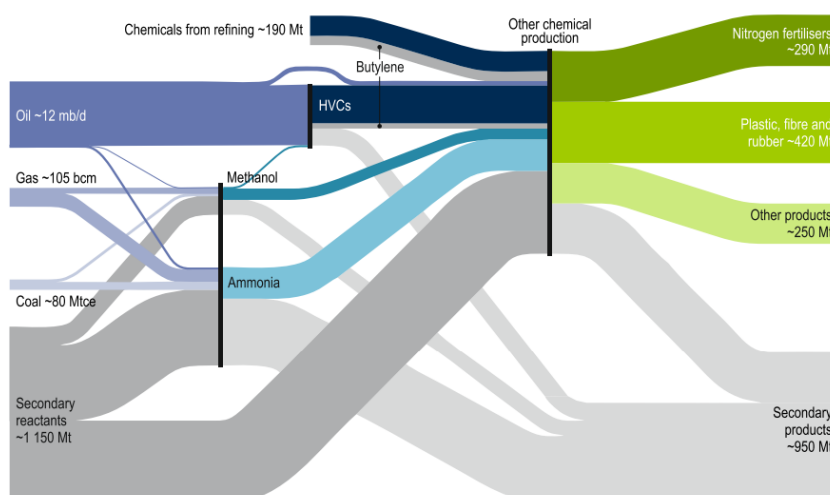


Figure 33 - Transformation des matières premières de l'industrie pétrochimique en 2017
(Source : The Future of Petrochemicals, AIE 2018)

Reste toujours la dépendance croisée au secteur des transports, lui-même dépendant du pétrole. Comme toute industrie, la pétrochimie s'appuie sur un système de transport de ses matières premières et de ses produits tout au long de ses chaînes de production.

3.2.2. Essor majeur attendu dans la pétrochimie

Par ailleurs, l'AIE prévoit une croissance 30% de la production de l'industrie pétrochimique d'ici à 2030 et de 60% d'ici à 2050 par rapport à 2017 causée majoritairement par une forte croissance de la demande en matières plastiques, en particulier au sein des pays émergents(64). Cette production a déjà doublé depuis 2000. La part de la demande en pétrole accaparée par ce secteur monterait à 18% d'ici 2050 si les tendances économiques actuelles se poursuivent. En Europe cette part est encore plus élevée et devrait passer de 15% à 21% en 2050. En 2018, le directeur général de l'AIE déclarait ainsi que « Les produits

pétrochimiques auront une plus grande influence sur l'avenir de la demande de pétrole que les voitures, les camions, l'aviation. »

Un tel essor de la demande du secteur alors que la disponibilité en pétrole est amenée à baisser simultanément risque de le mettre gravement en tension. Le coût de ses productions risque d'augmenter et il s'expose à des risques de pénuries de matière première, entraînant des ruptures dans les chaînes de production des plastiques et des médicaments. Les chaînes d'approvisionnement de ces derniers sont vulnérables à la baisse de disponibilité des matières premières selon un risque classé 8/10 selon l'étude de Breen en 2020(103).

A long terme, l'approvisionnement en matière première est voué à s'épuiser et la production de plastiques notamment par la voie pétrochimique ne pourra physiquement pas se maintenir à l'intensité actuelle.

3.2.3. Voies de production alternatives et réflexion d'échelle

Peu de substitutions au pétrole existent pour la production de médicaments. Les voies de synthèse alternatives sont plus coûteuses et nécessitent l'implémentation de nouvelles infrastructures pour leur production, ce qui impacterait les coûts des soins. De plus, une molécule produite selon une nouvelle voie de synthèse nécessite de renouveler les autorisations légales de mise sur le marché ce qui, appliqué à l'ensemble de la pharmacopée médicale, risque d'induire une importante inertie dans la disponibilité de ces médicaments(102). Wollensack *et al.*, en 2022, argumentent pour la nécessité de « défossiliser » la production des produits pharmaceutiques, par l'usage de biomasse comme matière première au lieu de pétrole ou par la séquestration de CO₂ atmosphérique(154). Les auteurs reconnaissent cependant que la première option impliquerait une pression sur les écosystèmes et une concurrence avec la sécurité alimentaire pour l'allocation de la biomasse et ne pas pouvoir correctement évaluer la faisabilité matérielle de la seconde option, qui nécessiterait une importante quantité d'électricité produite de manière soutenable.

La production de plastiques peut également se faire à partir de cellulose, malgré un prix plus élevé et la nécessité de développer d'importantes infrastructures à grande échelle(155). La problématique de l'allocation de la biomasse se pose alors à un ordre de grandeur encore supérieur et il ne paraît pas raisonnable d'imaginer que la production de plastique actuelle et encore moins celle projetée pour les prochaines décennies puisse être assurée par cette voie de synthèse.

Le recyclage peut être avancé comme étant une solution afin de s'émanciper du pétrole comme matière première en réutilisant les produits déjà créés. Le taux de recyclage dépend cependant de différents facteurs : le taux de collecte des plastiques usagés, le rendement du recyclage, et de si le produit recyclé pourra l'être à nouveau. En effet tous les plastiques ne se recyclent pas avec la même facilité, malgré une amélioration des rendements du recyclage une perte de 10 à 15% est toujours observée sur un cycle de recyclage et la majorité des déchets plastiques ne sont aujourd'hui pas collectés à cette fin(64). Ainsi, en 2017, seul 10% des plastiques historiquement créés ont été recyclés(156).

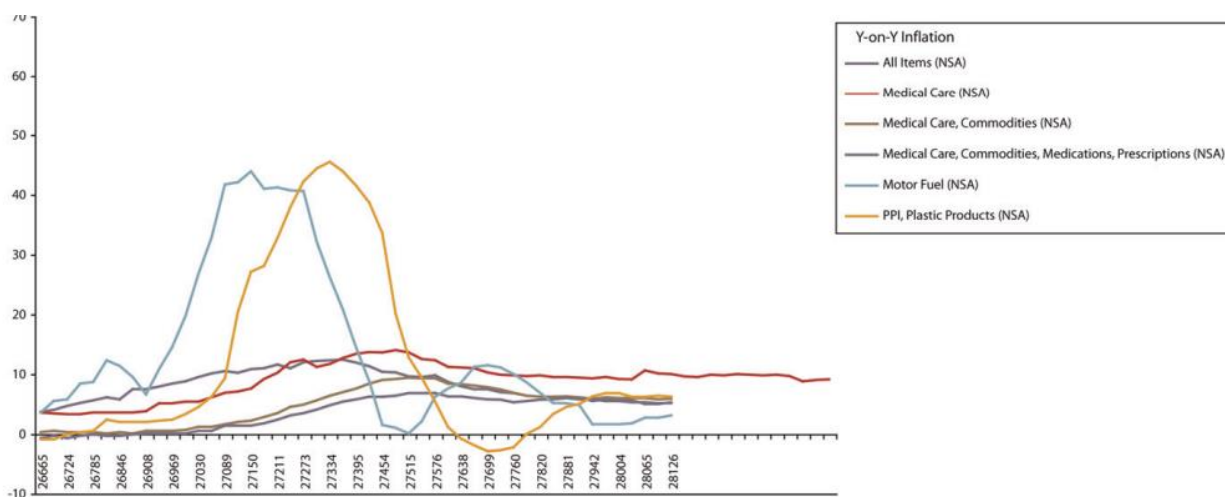
L'AIE développe un scénario dans lequel les objectifs de développement durables de l'ONU sont respectés incluant des contraintes importantes(64). Des hypothèses ambitieuses d'implémentation de la technologie de capture du CO₂ atmosphérique et de taux de recyclage sont employés. Dans ce scénario, la pétrochimie est le seul secteur qui conserve une croissance et la réduction de demande en pétrole par rapport au scénario précédent n'est que de 5% en 2030 et 13% en 2050. Ce faible gain souligne la difficulté à substituer cette matière première ou à l'incorporer dans une économie circulaire physiquement inatteignable pour une intensité de production pourtant revue à la baisse.

3.3. Impact sur le système de santé et application à la profession vétérinaire

3.3.1. Impact historique des crises pétrolières sur le système de soins

Peu de recherches ont étudié l'impact des crises pétrolières sur le système de santé. En 1975, à la suite du choc pétrolier de 1973, Kline s'inquiète des risques futurs de pénurie en énergie et en pétrole et des conséquences sur la disponibilité du matériel médical, alertant sur la disponibilité future incertaine des produits pétrochimiques et plastiques(157). Dans un article de 1981, avec Clark, ce même auteur revient sur les conséquences du choc pétrolier de 1973, dont l'atteinte du pic de production du brut aux Etats-Unis est un facteur déterminant, sur l'approvisionnement du système médical américain en fournitures plastiques(158). Ils argumentent qu'en raison de la faible part du pétrole allouée au matériel plastique médical (0,2% aux Etats-Unis, chiffre uniquement réévalué en 2011 par Hess *et al.* qui estiment que cette part est restée constante(97)) les risques de pénuries en domaine médical ne sont pas suffisamment pris en compte. À la suite de la crise de 1973, un déclin de 15% d'approvisionnement de pétrole a été observé aux Etats-Unis. Clark et Kline ne relèvent pas de pénurie majeure de matériel médical plastique mais estiment que cela aurait pu se produire si la crise avait duré quelques mois de plus. Ils observent en effet une augmentation des délais de livraison de matériel plastique, une hausse des coûts de livraison se répercutant sur le coût du matériel et des pénuries de matières premières comme le benzène ou l'éthylène dans les manufactures. Ils rapportent qu'une seule manufacture de matériel médical plastique aurait eu les capacités d'utiliser du verre comme matière première en cas de besoin de modifier la production et que les stocks nationaux ne sont pas assez fournis. Au Royaume-Uni également, Berton relève en 1974 des tensions importantes sur la production de matériel médical plastique lors de la crise pétrolière et alerte sur le fait que le matériel plastique n'est pas fait pour être restérilisé et n'est pas adapté lors de pénurie(159).

Hess *et al.* ont évalué l'évolution des prix à la suite des chocs pétroliers de 1973-1974 et de 1978-1980(97). Ils constatent une augmentation forte des prix du carburant et des matières plastiques à la suite des chocs suivie d'une augmentation globale du coût de la santé mais décalée de plusieurs mois. Les séries de prix relevées sur la période de la crise de 1973 sont représentés à la figure 34.



Note. NSA = nonseasonally adjusted; PPI = producer price index. To help depict trends, the figure presents additional years before and after the price-shock period.

Figure 34 - Inflation des prix de différentes consommations aux Etats-Unis autour de la crise pétrolière de 1973 (Source : D'après Hess *et al.*, 2011)

Cet effet sur les prix est encore bien visible pour la crise de 1978-1980 mais se fait moins sentir sur les suivantes (1990-1991, 1999-2001, 2006-2008) ce que les auteurs expliquent par le fait que le transport et les matières premières prennent de moins en moins de part dans le coût de la santé par rapport au travail humain avec le temps. Ils concluent à une action directe du déclin d'approvisionnement en pétrole sur une hausse modérée et décalée dans le temps du coût de la santé. Ils évaluent ainsi le secteur médical très exposé à un déclin d'approvisionnement du pétrole, moyennement vulnérable et avec cependant une bonne résilience à court terme. Ils craignent toutefois qu'une pénurie de longue durée par épuisement des réserves puisse avoir des effets bien plus sévères et durables.

3.3.2. Secteur privilégié en cas de restriction de ressources

Kline suppose en 1975 qu'en raison de la part marginale des ressources utilisées dans le secteur médical par rapport à l'ensemble de la société et de la plus-value importante de ce service, en cas de pénuries, ce secteur soit privilégié quant à l'allocation des ressources par les pouvoirs publics et soit ainsi préservé des effets brutaux d'une crise(157). Il appelle d'ailleurs à ce que les planificateurs, dans un contexte de rareté des ressources, se concentrent sur la priorisation de leur allocation rationnelle plutôt que de se reposer sur des indicateurs de croissance ou de consommation pour évaluer leurs décisions. Clark et Kline notent cependant en 1981 que lors de la crise de 1973 les pouvoirs publics des Etats-Unis n'ont accordé aucune priorité particulière au secteur médical sur l'allocation des stocks(158).

On peut cependant raisonnablement supposer qu'en cas de crise prolongée, notamment au sein d'un pays au modèle social développé comme la France, le secteur de la santé bénéficie d'une certaine priorité. L'activité vétérinaire en revanche, en particulier dans sa pratique libérale, est encore perçue comme une activité de service et il n'est pas garanti que son maintien soit considéré comme prioritaire dans la société.

3.3.3. Conséquences attendues du pic pétrolier

En résumé, la réduction de l'approvisionnement en carburant et en matière première pour l'industrie pétrochimie conjointe à la forte croissance de la demande pour cette industrie a de fortes chances d'augmenter les prix des produits pétrochimiques (médicaments et matériel plastiques) et de générer des épisodes de pénuries. Contrairement aux crises précédentes qui marquaient un ralentissement, parfois transitoire, dans la croissance de la demande en pétrole, le pic pétrolier caractérisera un déclin constant et durable. Les effets de hausse des prix et de pénurie risquent ainsi de s'intensifier avec le temps et de ne plus pouvoir être compensés par des réserves de sécurité ou par une allocation préférentielle des ressources au secteur de la santé. A long terme, de nouvelles voies de synthèse de matériel plastique ou de médicaments émancipés du pétrole est envisageable mais à une échelle de grandeur bien moindre que la production actuelle. Un retour à l'utilisation de matériaux traditionnels comme le verre ou la céramique pourra être partiellement envisagé pour des usages permettant la réutilisation du matériel afin de réserver les ressources plastiques là où du matériel jetable et parfaitement stérile est prioritaire (pose de cathéter par exemple). Il semble de plus improbable que cette transition se réalise suffisamment rapidement pour absorber les premiers effets du pic pétrolier en raison de l'inertie inhérente à l'implémentation de nouvelles infrastructures et de nouvelle réglementation pour les médicaments et des chocs susceptibles d'interrompre la continuité des soins risquent de se produire.

Par ailleurs, Hanlon et McCartney rappellent en 2008 que la santé des populations est plus impactée par des facteurs économiques et sociaux généraux que par les progrès technologiques ou des politiques de santé de court-terme(160). La santé au sens large est meilleure et progresse avec la croissance économique et la réduction des inégalités et régresse lors de récessions. Ils prévoient donc que les effets délétères du pic pétrolier sur l'économie et les récessions qu'il provoquera dégraderont de manière importante la santé publique. En effet, l'augmentation des coûts de la santé provoqué par la hausse des prix du carburant et des produits pétrochimiques ainsi que leur plus faible disponibilité réduira la possibilité d'accès aux soins pour de nombreuses personnes, en particulier les catégories de population précaire. Cet effet s'ajoute aux difficultés économiques que le pic pétrolier est susceptible d'infliger à tous les autres secteurs de la société. Cette inégalité et réduction globale d'accès aux soins paraît pouvoir se transposer aisément à la médecine vétérinaire, moins appuyée par les pouvoirs publics que la santé humaine, et il est probable qu'un grand nombre d'animaux voient leur accès aux soins se dégrader.

3.3.4. Réorganisation nécessaire de la gestion du matériel et des stocks d'une clinique vétérinaire

Les effets précédemment décrits du pic pétrolier auront pour conséquence pratique la nécessité de réorganiser de manière optimale la gestion du matériel d'une clinique vétérinaire afin d'augmenter sa résilience aux pénuries et de maximiser la quantité de soins qu'elle sera capable d'assurer. Malgré des phénomènes de pénuries et de rupture d'approvisionnement en matériel et médicaments déjà existants en médecine vétérinaire, la livraison rapide par les centrales d'achat permet actuellement de réguler efficacement les stocks d'une clinique et de les maintenir en flux tendu, épargnant d'avoir à gérer des réserves trop importantes dont l'écoulement n'est pas garanti, sans trop d'organisation préalable. Avec un service de livraison amené à devenir de plus en plus incertain et cher, la gestion des réserves d'une clinique deviendra une contrainte plus importante qu'auparavant. Avoir la meilleure vision possible de ses réserves et anticiper leur consommation sera nécessaire. L'augmentation des réserves de sécurité en médicament et matériel pourra être intéressante si celle-ci est suffisamment bien gérée pour ne pas provoquer de gaspillage par dépassement des dates de péremption par exemple. Il sera certainement nécessaire d'allouer plus de temps de travail humain et d'exploiter au mieux les outils informatiques afin d'optimiser cette gestion.

Les ressources de la clinique devenant plus rares et précieuses, qu'il s'agisse des médicaments ou du matériel, il deviendra nécessaire de les allouer correctement et rigoureusement car elles ne seront plus abondantes et bon marché. Ceci implique de se diriger vers une certaine sobriété en matériel, qu'elle soit contrainte par la pénurie ou volontaire afin de se prémunir des pénuries futures et de minimiser la part des consommables dans le coût final des soins. Il sera alors pertinent de systématiser certaines pratiques : la réutilisation du matériel plastique lorsque c'est possible, l'usage de matériel lavable ou pouvant être stérilisé (champs opératoires en tissus, casques lavables...). Comme recommandé par l'AIE, il faudra chercher à maximiser le recyclage du plastique. La réutilisation de matériel traditionnel comme les seringues en verre pourra être nécessaire. La gestion de l'asepsie du matériel requerra nécessairement plus d'organisation et de temps au sein de la clinique par rapport à l'usage de matériel jetable. En accord avec les recommandations d'une thèse vétérinaire de 2009 sur le développement durable dans une clinique vétérinaire, la sobriété en matériel passe également par la réalisation de meilleurs choix à l'achat des produits et lors de leur utilisation(161). Les recommandations sont d'utiliser les doses minimales efficaces des médicaments et que chaque acte médical soit justifié et pertinent afin de pas consommer de matériel de manière superflue.

Bien entendu l'ensemble de ces principes existe déjà dans les pratiques courantes des cabinets vétérinaires mais leur application rigoureuse et systématique risque de devenir nécessaire à la soutenabilité et à la résilience d'une pratique vétérinaire dans les décennies à venir. Une réflexion chiffrée et ciblée afin d'agir en priorité sur les leviers les plus efficaces et avec le degré d'effort requis semble nécessaire.

3.3.5. Dégradation de la qualité du service

Malgré toutes les adaptations précédemment envisagées, la qualité du service de soins, que ce soit en santé humaine ou animale, est amené à se dégrader. Le niveau de qualité précédemment atteint reposait sur l'usage intensif de matériel plastique bon marché et jetable, sur des déplacements rapides et peu coûteux, la vaste pharmacopée issue de la pétrochimie et un certain niveau d'accessibilité, spatiale et financière, aux soins. Ce niveau de service ne semble pas pouvoir être maintenu avec une réduction de la quantité de traitements et de matériel disponible, la hausse du coût de la santé ainsi que les difficultés économiques générales qui réduiront l'accès aux soins et leur qualité pour un certain nombre de patients, humain et animaux.

Une adaptation progressive à ces changements permettrait d'en minimiser les impacts et de conserver une qualité de service la plus haute possible malgré les contraintes. Hanlon et McCartney jugent cependant peu probable que les mécanismes actuels du marché anticipent ou résolvent le problème alors qu'une planification importante serait nécessaire afin de réduire les conséquences du pic pétrolier sur la santé(160). Ils jugent que les professionnels de santé sont parmi les nombreux groupes qui devraient prendre en main cette problématique le plus vite possible. Il semble en effet de la responsabilité des institutions vétérinaires et des praticiens d'organiser la profession afin d'assurer au mieux sa viabilité et sa qualité de service maximale. Schwartz *et al.*, interrogeant en 2011 les conséquences du pic pétrolier et d'un déclin de l'énergie disponible sur la santé publique appellent à ce que les incertitudes subsistant sur la date du pic, sa forme et ses conséquences ne devraient pas retarder l'action afin de se prémunir au maximum de ses effets(91).

4. Modification du secteur agricole et des filières d'intérêt vétérinaire

4.1. Pratique vétérinaire intégrée au secteur de l'agriculture

D'après le CNRTL l'agriculture correspond à l'activité par laquelle l'homme exploite des terres en vue de la production de végétaux utiles à l'homme et à l'élevage d'animaux(162). Culture et élevage sont donc deux facettes en étroite relation au sein de l'agriculture. Le métier de vétérinaire et son expertise s'est historiquement développé en lien avec les gouvernements afin de contribuer à la santé publique et de préserver la santé du bétail dans un contexte d'épidémies animales importantes(163). L'activité vétérinaire était alors presque exclusivement tournée vers les animaux de production ou les animaux de trait, utilisés pour la production alimentaire.

Aujourd'hui l'activité vétérinaire s'est diversifiée et les vétérinaires exercent au sein de différentes filières. Si les soins aux animaux de compagnie sont devenus prépondérants en France, 17,3% des vétérinaires inscrits à l'ordre en 2022 exercent encore une pratique rurale pure ou à dominante rurale. Les filières d'animaux de rente incluent principalement l'élevage bovin, à destination d'une production laitière ou allaitante incluant des élevages mixtes, l'élevage industriel de volaille pour la production d'œufs ou de volaille de chair et l'élevage porcin. L'activité à destination des bovins génère 80% du chiffre d'affaires vétérinaire des filières animaux de rente et 23% du chiffre d'affaire total de la profession en 2016(145).

Sous certains statuts, les vétérinaires ne proposent plus seulement une activité de service aux éleveurs mais une activité de surveillance sanitaire d'intérêt national. C'est le cas lorsqu'ils agissent sous statut de vétérinaires sanitaires ou de vétérinaires mandatés. Il en va de même pour les vétérinaires fonctionnaires de l'administration et ceux travaillant en aval de la chaîne de production alimentaire qui assurent, de l'abattoir à la consommation, la sécurité alimentaire des produits animaux.

Ainsi, une part significative de l'activité vétérinaire en France est toujours intégrée au secteur de l'agriculture, qu'il s'agisse d'une pratique libérale ou de missions sanitaires publiques. La formation des étudiants vétérinaires est actuellement majoritairement assurée par des écoles nationales publiques sous tutelle du Ministère de l'Agriculture. Il découle de cet état des lieux qu'un bouleversement de ce secteur et en particulier de l'élevage se répercutera nécessairement sur une partie de l'activité vétérinaire.

4.2. Dépendance majeure du système agro-alimentaire aux hydrocarbures

4.2.1. Notion de système agro-alimentaire

Afin de comprendre les enjeux de la dépendance énergétique de l'agriculture au pétrole il convient de définir la notion de système agro-alimentaire et les conversions d'énergie qu'il produit. Kim *et al.*, en 2018, décrivent un système agro-alimentaire comme étant un système de conversion d'énergie et de matière(164). En s'appuyant sur les techniques de l'agriculture et de l'élevage, il exploite l'énergie solaire et la photosynthèse des plantes afin de produire de l'énergie sous forme de surplus alimentaire. Ce système nécessite l'apport d'une énergie technique, dont l'origine peut être interne ou externe au système. Sa représentation conceptuelle décrite par Harchaoui et Chatzimpiros en 2018 est représentée à la figure 35(165).

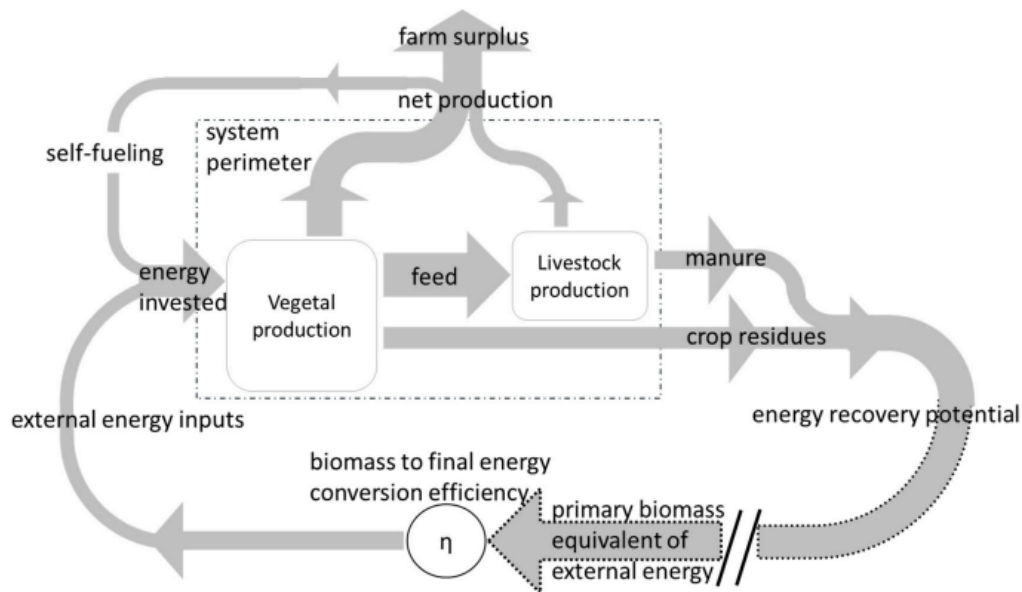


Figure 1. Generic representation of the energy flows in agriculture.

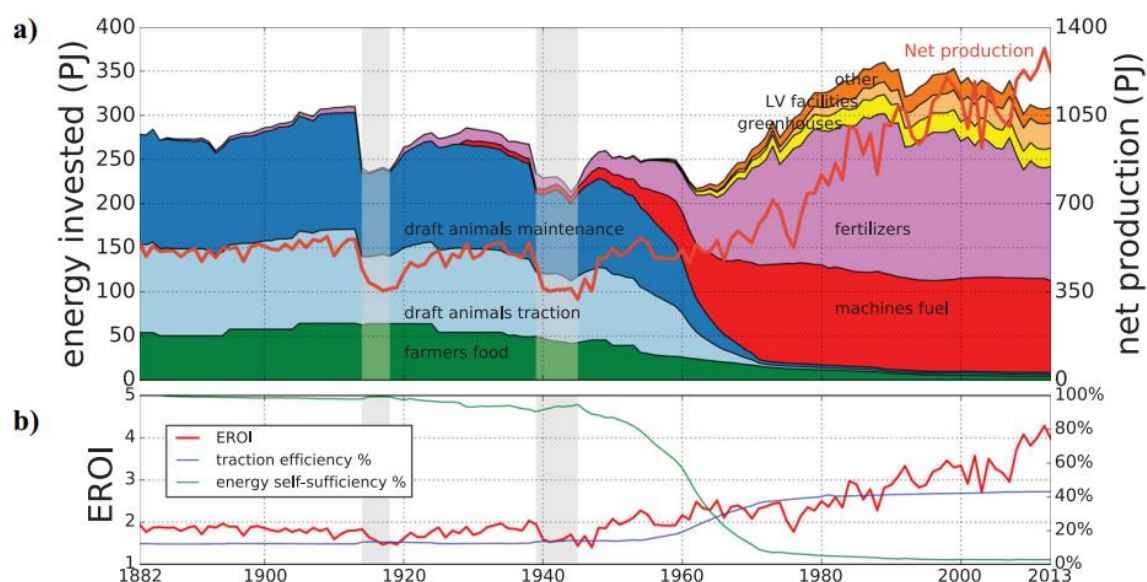
Figure 35 - Représentation des flux d'énergie traversant un système agro-alimentaire
(Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)

Le système produit une certaine quantité d'énergie alimentaire, c'est la production nette, dont une partie peut être réinvestie dans le système dans l'alimentation des animaux de travail et celle des agriculteurs afin de produire leur force de travail. Le reste correspond au

surplus de production, destiné à l'utilisation humaine, essentiellement pour l'alimentation ou la production de bio-carburant de première génération. Afin d'incorporer dans le système suffisamment d'énergie pour qu'il fonctionne, l'énergie technique investie peut être apportée de manière externe, par exemple par la consommation de carburant pour les machines ou par l'énergie cristallisée dans les engrais utilisés. Le système produit aussi des résidus de culture et du fumier, qui peuvent potentiellement être réutilisés comme source d'énergie à investir dans le système. Au sein de ce système, on constate qu'une partie de la production végétale est détournée de la production nette afin de servir d'alimentation aux animaux pour la production animale.

4.2.2. Perte de l'autonomie énergétique du secteur de l'agriculture lors de la révolution agricole du XXe siècle

En France, et plus largement dans l'ensemble des pays ayant réalisé une révolution agricole, les parts relatives des énergies externes et internes au système utilisées pour son fonctionnement ont été profondément modifiées. Harchaoui et Chatzimpiros, en 2019, ont étudié les évolutions des sources d'énergie du système agro-alimentaire français de la fin du XIXe siècle à 2013 et leurs conséquences sur la productivité agricole et l'autonomie énergétique de l'agriculture (Figure 36)(86).



(a) Energy invested per source (petajoules; PJ) and net production (PJ). Self-fueling is the sum of farmers' food and of draft animal feed for traction and maintenance. Other includes energy for irrigation and embodied energy in pesticides and imported feed. (b) Energy return on energy invested (EROI), traction efficiency (%), energy self-sufficiency (%).

Figure 36 - Substitution des sources d'énergie investies dans l'agriculture de 1882 à 2013 en France et efficacité de l'agriculture (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2019)

De la fin du XIXe siècle aux années 40, le système agro-alimentaire français fonctionne avec une quasi-autonomie énergétique. L'énergie investie dans le système provient exclusivement d'une auto-alimentation provenant de la production nette réinvestie dans l'alimentation des fermiers et la maintenance des animaux de traits.

Au cours du XXe siècle, avec un point d'inflexion autour de 1960, de manière sensiblement concomitante avec l'essor de la production de pétrole, la révolution agricole française a causé la substitution des sources d'énergie investies dans l'agriculture. Le nombre de tracteurs en France est passé de 27 000 en 1929 à plus d'un million aujourd'hui ce qui les rend plus nombreux que le nombre d'agriculteurs actifs. Les engrais correspondent à un apport

d'énergie indirecte et leur part est passée d'un niveau marginal à près de la moitié de l'énergie investie dans l'agriculture. L'énergie concernée est incorporée dans les engrais, dépensée pour leur production. Les engrais azotés sont les engrais les plus coûteux à produire en termes d'apport d'énergie externe fossile et sont généralement considérés comme responsables de l'ensemble des dépenses énergétiques pour la classe des engrais(166). A cela s'ajoute l'utilisation de serres, de bâtiments pour l'élevage et d'autres investissements énergétiques plus marginaux.

La mécanisation de l'agriculture fonctionne grâce à la consommation de carburants dérivés du pétrole, sans compter l'énergie investie dans la production même des machines. Les engrais azotés, produits par la pétrochimie selon le procédé Haber-Bosch sont issus à 100% d'énergie fossile dont 50% de gaz naturel. Le tableau 2 récapitule les sources d'énergie utilisées dans l'agriculture en France en 2013(165). 91% de l'énergie investie dans l'agriculture est dépendante d'énergie fossile externe au système et 80% de l'énergie apportée est contenue dans le carburant des machines et l'usage d'engrais.

Use	Current Fossil Fuel (%)	Final Energy PJ	Energy Type
Fertilizers	100	142	0.5 gas/0.5 heat
Machines fuel	100	103	mechanical
Greenhouses	81	17	0.5 mechanical/0.5 heat
LV facilities	35	29	0.5 mechanical/0.5 heat
Other	75	15	mechanical
Total	91	306	

Tableau 2 - Energie finale consommée dans l'agriculture en France en 2013
(Source : D'après Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)

Il est intéressant de noter que contrairement au mix énergétique global qui a vu les nouvelles formes d'énergie s'ajouter, les formes d'énergie initialement investies dans l'agriculture ont été entièrement substituées par les nouvelles qui, à partir des années 70 sont presque exclusivement d'origine externe au système. Alors que la quantité d'énergie investie n'a augmenté que de 15% sur la période étudiée, le niveau d'auto-suffisance du système est passé de 100% au début du XXe siècle à 2% en 2013(86).

A l'échelle mondiale, Arizpe *et al.*, montrent en 2011 que la dépendance aux énergies fossiles de l'agriculture est très hétérogène et concerne principalement les agricultures industrialisées mais que la tendance est à l'industrialisation de l'ensemble des agricultures du monde(166). La dépendance aux énergies fossiles réside alors, comme dans le cas de la France, dans la fabrication et l'entretien des machines, leur consommation en carburant, la production d'engrais et de pesticides, l'irrigation et les infrastructures. Les pays en développement manifestent les mêmes évolutions qui ont sous-tendu l'industrialisation de l'agriculture française. Ils tendent à gagner en dépendance en raison de la réduction du nombre d'agriculteurs en réponse à l'évolution du modèle socio-économique du pays en émergence et de la forte croissance démographique locale réduisant le nombre d'hectares de terre arable par individu. Ces phénomènes sont compensés par l'implémentation de machinerie et l'utilisation d'engrais ainsi que la hausse de productivité des sols et du travail via des progrès techniques, induisant un apport grandissant d'énergie externe.

4.2.3. Gains de productivité du système

Cette évolution a permis une hausse du rendement et de la productivité indéniable, ayant permis d'accompagner une croissance démographique importante et permettant à la France d'être un exportateur net de produits agricoles(165). Les engrais, les pesticides et les

techniques d'irrigation ont considérablement augmenté la productivité des sols tandis que la mécanisation a permis de travailler la terre de manière rapide et efficace pour une main d'œuvre minimale, augmentant considérablement la productivité du travail. Ainsi, pour une augmentation globale de l'énergie investie de 15% seulement, le surplus alimentaire a été multiplié par quatre(165) et la production nette en énergie du système a été multipliée par deux, passant de 525 PJ en 1900 à plus de 1200 PJ en 2013 alors même que le nombre de travailleurs dans l'agriculture n'a cessé de baisser(86). En 1900, le taux de retour énergétique ou EROI en anglais (pour Energy Return on Investment) qui donne le rapport entre l'énergie investie et l'énergie retirée d'un processus, était environ de deux. Dans un système en auto-alimentation, cela signifie que la moitié de la production nette du système devait être réinvestie dans celui-ci pour qu'il fonctionne. Ce TRE a été multiplié par deux en quelques décennies (voir figure 35). Un certain nombre de progrès techniques reposant massivement sur les énergies fossiles, en particulier le pétrole et le gaz naturel, ont permis de considérablement augmenter les rendements agricoles et de nourrir une population croissante tout en réduisant la part de population travaillant dans l'agriculture.

4.2.4. Changement alimentaire : coût énergétique de la production de produits d'origine animale

Malgré les gains de productivité phénoménaux dans l'agriculture, le changement alimentaire vers la consommation croissante de produits animaux rend le surplus agricole inférieur à ce qu'il pourrait être. En effet, le rôle des animaux au sein de l'agriculture a évolué avec le temps, passant de vecteurs d'énergie mécanique avec l'utilisation de la force de travail des animaux de traits à producteurs de produits animaux destinés à la consommation humaine (viande et lait principalement)(165). La consommation de produits animaux par personne a ainsi considérablement augmenté au cours du XXe siècle alors même que la population est passée de 1,6 milliards d'individus à 6 milliards au cours de celui-ci(167). La consommation de protéines animales a augmenté de 50% par individu de 1961 à 1998 et la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) estime que les consommations de viande et de produits laitiers augmenteront respectivement de 76% et 62% entre 2005 et 2050(168).

Or, l'on observe sur la représentation conceptuelle détaillée d'un système agro-alimentaire (Figure 37) que les animaux de production captent une partie de la production primaire nette végétale de l'agriculture sous forme d'alimentation (« feed » en anglais) afin de produire les produits animaux qui entrent dans la production nette sortant du système(86). Or les animaux convertissent leur apport alimentaire selon un certain rendement (efficacité de conversion

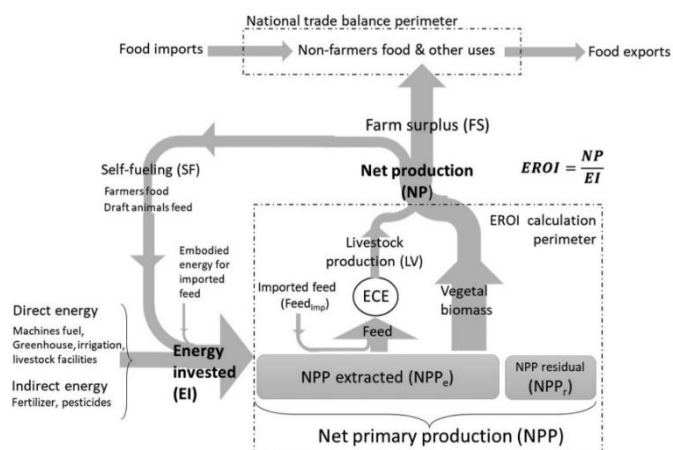


Figure 37 - Flux d'énergie détaillés dans un système agro-alimentaire (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2019)

énergétique : ECE). Moins de calories d'origine animale sont nécessairement produites que les calories investies dans leur alimentation.

Or, si une partie du bétail, en particulier les ruminants, est capable d'exploiter de la biomasse non consommable directement par l'homme, une partie importante de l'alimentation animale est composée de céréales ou d'oléagineux comestibles. Une part de la biomasse susceptible d'entrer dans le surplus agricole est ainsi détournée pour la production de produits animaux avec un rendement moindre. Ainsi, 70% des terres agricoles mondiales sont destinées à l'élevage, pour les animaux eux-mêmes ou pour la production de leur alimentation et 36% des céréales en France et dans le monde sont consacrées à la consommation animale(168). Harchaoui et Chatzimpiros ont étudié l'évolution de l'efficacité de conversion énergétique des différentes productions animales en France de 1960 à 2010 et s'ils observent que les ECE de l'ensemble des productions ont progressé, parfois considérablement, sur cette période, l'ECE moyen de l'ensemble du cheptel reste inférieur à 10% avec l'ECE de la production de volaille et d'œufs étant la plus élevée aux alentours de 22%(168). En 2013, 555 millions de tonnes de protéines végétales ont été produites dans le monde et 80% d'entre elles sont entrées dans la consommation animale pour une production finale de 89 millions de tonnes de protéines animales seulement(169).

L'abondance énergétique et la hausse des rendements agricoles ont ainsi permis une transition alimentaire vers la consommation de produits animaux pourtant bien plus coûteux énergétiquement que leur équivalent végétal. Il s'agit d'un mode de production non optimal afin de répondre à une demande sociétale d'accroître la part des produits animaux dans l'alimentation.

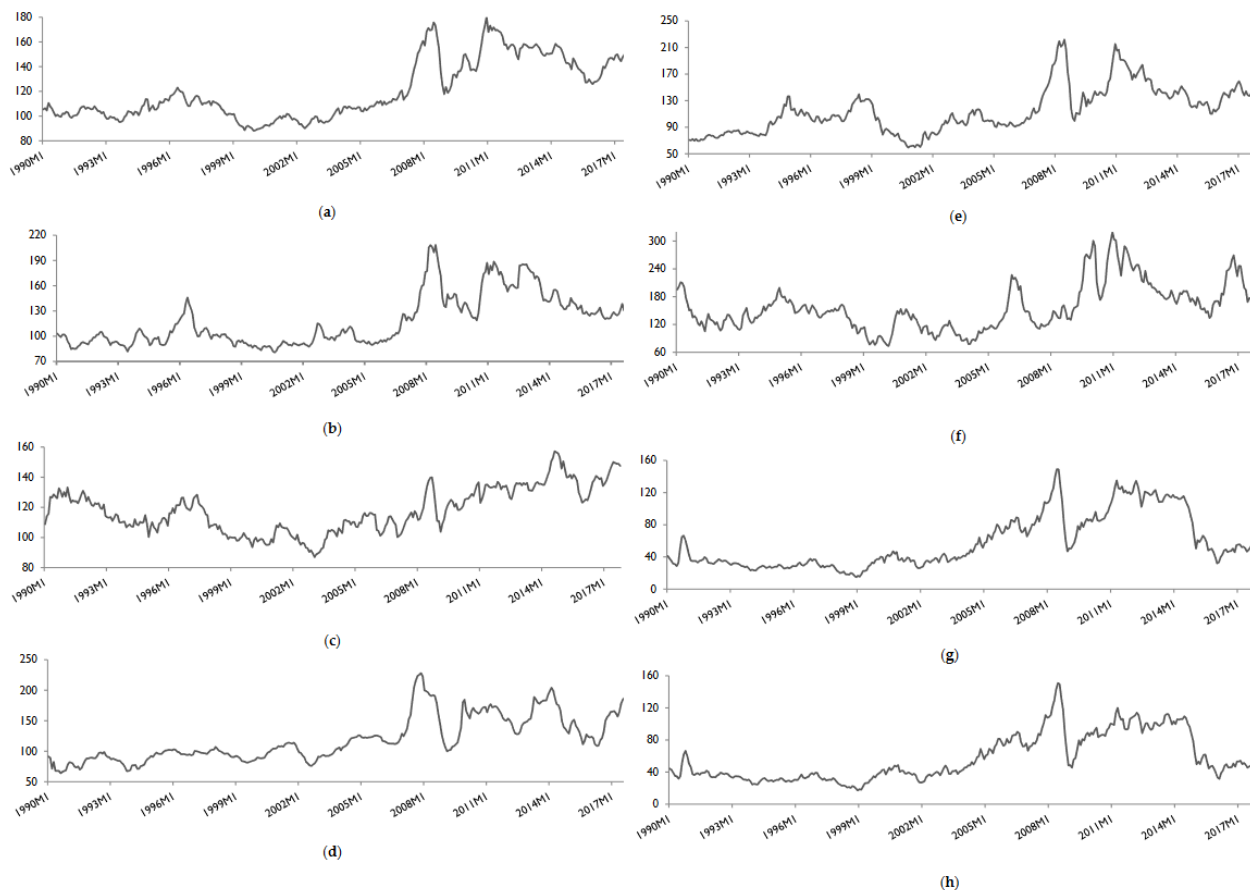
4.2.5. Vulnérabilité au pic pétrolier : vers une insécurité alimentaire

Considérant que le système agro-alimentaire dépend à 98% d'une énergie externe quasi exclusivement fossile, dont plus d'un tiers correspond au pétrole utilisé par les machines et un quart au gaz naturel intervenant dans la fabrication des engrais (Tableau 2), un déclin dans la disponibilité de ces ressources ou une hausse de leur prix se répercute nécessairement sur le surplus agricole du système. En effet de nombreuses études ont montré que la hausse du cours du pétrole et sa volatilité a un effet causal sur la hausse du prix de la nourriture alors qu'une augmentation de la disponibilité en pétrole tend à réduire le prix de l'alimentation(170–172). Une étroite corrélation entre le cours du brut et les indices de prix des différents produits alimentaires est visible sur la figure 38.

Ainsi, une augmentation des prix du pétrole et du gaz naturel causé par les pics de production de ces ressources entraînerait une hausse conséquente des coûts des produits alimentaires et leur part dans le budget d'un ménage se verrait fortement renforcée.

De plus, une réduction de la disponibilité de ces ressources pour l'agriculture à la suite du pic pétrolier entraînerait une réduction proportionnelle du surplus agricole(165). Dans un contexte de croissance démographique mondiale et de transition alimentaire en cours des pays émergents vers une augmentation de la consommation des produits animaux, un fort risque d'insécurité alimentaire est soulevé par différentes études. Leng alerte en 2005 sur la vulnérabilité des agricultures industrialisées au déclin du pétrole et des conséquences sur les autres pays importateurs d'une réduction du surplus agricole des pays exportateurs comme les Etats-Unis ou la France(173). Ses préoccupations sont partagées par d'autres auteurs tels que Arizpe *et al.*, Neff *et al.*, Harchaoui et Chatzimpiros(165, 166, 174).

Leng ajoute que dans un système industrialisé comme celui des Etats-Unis, l'agriculture repose sur un système étendu de transports, également vulnérable au déclin du pétrole(173). Neff *et al.*, en 2011 rappellent que le pétrole, via le secteur des transports, facilite grandement



*Figure 38 - Corrélation entre les indices des produits alimentaires et le prix du pétrole
(Source : D'après Zmami et Ben-Salha, 2019)*

(a) indice des prix de la nourriture ; (b) indice des prix des céréales ; (c) indice des prix de la viande ; (d) indice des prix des produits laitiers ; (e) indice des prix des huiles végétales ; (f) indice des prix du sucre ; (g) prix du pétrole brut du Brent (\$ américain par baril) ; (h) prix du pétrole brut du WTI (West Texas Intermediate) (\$ américain par baril)

la mondialisation des chaînes d'approvisionnement alimentaires(174). Bien que globalement exportateur, les Etats-Unis importaient en 2011 44% de ses fruits et 14% de ses légumes. Au sein même du pays, un produit alimentaire habituel parcourait en moyenne 2400 km après sa production avant d'être consommé. La sécurité alimentaire dépend ainsi, au-delà des énergies fossiles nécessaires à sa production, du réseau de transports basé sur la consommation de pétrole utilisé pour la distribution de la nourriture.

Les difficultés d'accès à l'énergie et aux matières premières permettant le fonctionnement de l'agriculture à hauts rendements vont se produire alors même que la demande pour le surplus agricole va croître. En raison de la croissance démographique et du changement alimentaire, la FAO estime que la production agricole mondiale devrait augmenter de 70% de 2010 à 2050 afin de nourrir les 9,1 milliards d'êtres humains présents sur Terre selon les projections de l'ONU(174). Par ailleurs, outre les questions de disponibilité en énergie, d'autres forces dépassant le cadre de ce travail sont susceptibles de réduire de manière concomitante les rendements agricoles, aggravant l'insécurité alimentaire, en particulier le changement climatique, la baisse des ressources en eau et la baisse de la productivité des sols(132, 175). Pour Holechek en 2009, de nombreux facteurs vont bouleverser de manière importante l'agriculture à l'avenir mais il considère l'épuisement des ressources et en particulier des carburants fossiles comme étant le facteur central(176).

4.3. Limites de l'innovation technique

4.3.1. Faible perspective d'amélioration de l'efficacité énergétique de la production d'engrais.

Il pourrait être tentant d'imaginer que les progrès techniques puissent permettre de suffisamment augmenter les rendements des processus intervenant dans l'agriculture, telle qu'ils ont déjà fortement augmenté par le passé, afin de compenser la réduction d'énergie investie dans le système et maintenir identique le surplus agricole. Cependant, alors que la fixation de l'azote est l'étape nécessitant le plus d'énergie dans la production d'engrais(177) et que les engrais azotés peuvent être considérés comme les engrais les plus coûteux à produire, l'efficacité énergétique de ce processus semble atteindre une asymptote (Figure 39) avec des gains d'efficacité toujours moindres. Peu de perspective d'amélioration significative susceptible de compenser le déclin des ressources semble ainsi pouvoir être raisonnablement attendue à ce poste, en raison du plateau atteint dans l'efficacité énergétique de la production d'engrais azotés mais aussi dans l'efficacité d'utilisation de l'azote dans l'agriculture qui atteint également un plateau en France selon les études de Harchaoui et Chatzimpiros(86).

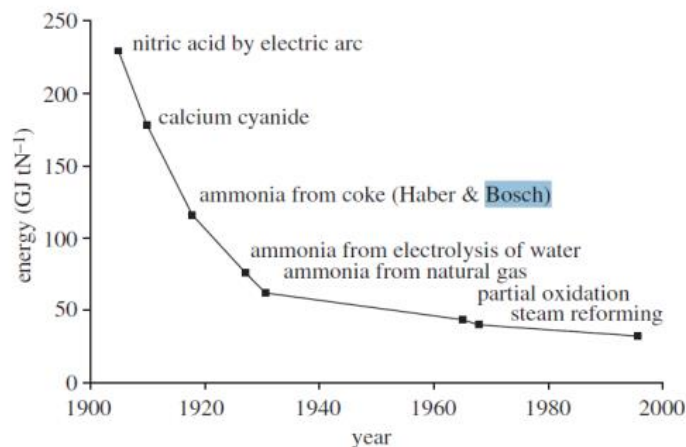


Figure 39 - Gain d'efficacité énergétique de la fixation de l'azote au XXe siècle
(Source : D'après Kongshaug, 1998)

4.3.2. Atteinte d'un plateau dans la production de la photosynthèse

De manière similaire, les progrès techniques et la sélection génétique ont permis de considérablement augmenter l'efficacité de la photosynthèse des plantes cultivées. Cependant, bien que l'efficacité atteinte soit inférieure aux limites théoriques de la photosynthèse et que des recherches soient entreprises afin d'augmenter l'efficacité de l'exploitation de la photosynthèse par l'agriculture(178), il semble qu'un plateau soit également atteint dans les gains d'efficacité de celle-ci, de nombreux travaux estimant que les techniques d'agriculture actuelles sont déjà proches de son optimisation maximale(179, 180). Des progrès semblent être possibles mais au prix de beaucoup d'efforts techniques et de recherches qui se sont pour l'instant révélées infructueuses(178) tandis qu'il apparaît que les conséquences du changement climatique, en particulier les sécheresses et la hausse des températures aura de manière bien plus certaine tendance à réduire le rendement de la photosynthèse(181, 182). Au regard de ces travaux il semble peu probable d'augmenter encore significativement les rendements agricoles des agricultures industrialisées.

4.3.3. Difficultés de l'électrification du système agro-alimentaire

Contrairement à la mobilité légère, l'électrification de l'agriculture semble beaucoup plus complexe à mettre en œuvre. Actuellement en France l'agriculture est électrifiée à 9% et Harchaoui et Chatzimpiros estiment que l'essentiel de son énergie ne peut pas l'être, son potentiel d'électrification s'élevant selon eux à 22% si l'ensemble des équipements fixes (bâtiments, irrigations, serres...) sont parfaitement électrifiés(165). Le reste de l'énergie investie dans l'agriculture vient de la mécanisation et de la production d'engrais.

Selon Harchaoui et Chatzimpiros, la machinerie déployée sur le terrain fournit un travail nécessitant une puissance électrique qui ne pourrait être fournie efficacement par batterie mais seulement par une connexion au réseau électrique(165). Or l'échelle des exploitations agricoles et la nature des travaux requis ne semble pas permettre la connexion des machines au réseau dans la grande majorité des cas. La réduction de la taille des exploitations, la réduction de la puissance des machines et donc leur multiplication et l'adaptation des structures pourrait permettre d'incorporer plus d'électrification dans l'agriculture mais nécessite d'importants changements, à mettre en œuvre sur le long terme.

Une étude plus récente de Scolaro *et al.*, réalisée en 2021, revoit la littérature existante sur les possibilités d'électrification de la machinerie dans l'agriculture, essentiellement des tracteurs(183). Les difficultés d'électrifier les tracteurs sont soulevées et concernent essentiellement l'intensité et la variabilité des puissances déployées, d'une dizaine de kW à plus de 250 kW ainsi que l'utilisation du moteur pour du travail auxiliaire à la simple traction du véhicule, qui complexifie grandement les mécaniques en jeu. Comme pour les véhicules routiers, différents prototypes de tracteurs électriques ont été développés. On retrouve les tracteurs hybrides, avec différents degrés d'hybridation, c'est-à-dire différents pourcentages de la puissance produite provenant de la source électrique. Ce sont les modèles les plus réalisables mais ils n'adressent que partiellement le problème de l'indépendance au pétrole puisque les plus hauts niveaux d'hybridation ne dépassent pas 35% et leur coût est très élevé. L'étude rapporte que des auteurs ont par le passé jugé la réalisation de tracteurs électriques à batterie (TEB) infaisable. Il paraît cependant que la conception de TEB de faible puissance puisse être réalisée et une étude a montré que deux TEB de 36kW permettent d'opérer sur une ferme de production laitière de 200 ha avec cultures à la place d'un tracteur conventionnel de 160 kW. L'usage de TEB à grande échelle et pour l'ensemble des travaux de l'agriculture n'est cependant pas jugé réalisable et les tracteurs à pile combustible (TPC) à hydrogène semblent plus prometteurs. Ils bénéficient d'une plus grande densité énergétique permettant de développer plus de puissance et d'une recharge plus rapide que celle d'une batterie de tracteur. Leur développement est cependant contraint par l'implémentation d'infrastructures de production, de transport et de ravitaillement d'hydrogène encore inexistantes. L'article conclut en déclarant que la technologie des tracteurs électriques est au stade débutant de son développement et soumis à de nombreuses contraintes. Peu des prototypes proposés par l'industrie ont été produits en série et aucun à large échelle, faute de marché et d'infrastructures adéquates. De plus, ne sont pas abordés les problématiques de la surconsommation d'électricité nécessaire au fonctionnement d'un parc de tracteurs électriques ainsi que le rythme de remplacement de ce parc et de l'implémentation des infrastructures nécessaires. Comme pour les véhicules routiers, la source d'énergie produisant l'électricité doit être décarbonée pour adresser le problème sans aggraver le réchauffement climatique. L'électrification de la machinerie de l'agriculture, si elle doit être encouragée et représentera certainement une part des adaptations au pic pétrolier ne semble pas à même de remplacer significativement l'utilisation de pétrole pour la mécanisation de l'agriculture à court et moyen terme.

La production d'engrais pourrait théoriquement être réalisée en produisant l'hydrogène précurseur à la création d'ammonium par électrolyse de l'eau plutôt que par consommation de gaz naturel, ce qui substituerait la source d'énergie de sa production par de l'électricité potentiellement décarbonée et renouvelable. Actuellement, l'ammonium représente 30% de la production des produits primaires de la pétrochimie (Figure 32) dont 80% sont destinés à la production d'engrais et près de 75% du gaz naturel utilisé dans la pétrochimie sert à produire de l'ammonium(64). Produire des engrais par électrolyse nécessiterait 60% d'énergie de plus qu'avec du gaz naturel(184). Le rapport de l'AIE sur le futur de l'hydrogène prévoit une hausse de la demande en hydrogène de la pétrochimie de 1,7% par an de 2018 à 2030(104), ce qui inclut également la production de méthanol. La hausse devrait ensuite se poursuivre mais la part d'hydrogène consacrée aux engrais devrait atteindre un plateau. Satisfaire entièrement cette demande par électrolyse nécessiterait 3000 TWh d'électricité supplémentaires (l'ammonium comptant pour 60% de ces besoins), préférentiellement décarbonée. Cela correspond à 11% de la génération d'électricité mondiale en 2018 et implique la construction de plus de 3500 électrolyseurs actuels soit 6 à 7 par semaine si la transition devait être réalisée d'ici 2030, ce qui donne une idée de la quantité d'infrastructures à mettre en place. Par ailleurs, la pétrochimie ne sera vraisemblablement pas le seul secteur à être demandeur en hydrogène produit par électrolyse, celui-ci trouvant également un intérêt dans l'industrie de la métallurgie et les transports avec les VPC par exemple. La production d'hydrogène par électrolyse semble être pertinente afin de réduire la dépendance aux ressources fossiles et pour réduire les émissions de CO₂ mais cette voie de production semble incapable d'assurer la synthèse des engrais à l'échelle de grandeur de leur utilisation actuelle à court et moyen terme, même si une production marginale peut être envisagée.

4.3.4. Nécessaire réorganisation interne du système

Sans perspective d'amélioration technique conséquente de l'agriculture, le déclin des sources d'énergie externes se répercutera proportionnellement sur la production nette de l'agriculture. Afin d'assurer la sécurité alimentaire du pays et des pays dépendants de nos exportations, il convient de transformer le système agro-alimentaire afin qu'il gagne en autonomie énergétique et d'augmenter la part d'énergie investie ayant une provenance interne au système.

4.4. Exemple d'une agriculture contrainte par une pénurie de ressources et de pétrole : Le cas de Cuba

4.4.1. Une agriculture industrialisée

Dans le cadre de l'étude des conséquences du pic pétrolier sur une agriculture industrialisée, Cuba fait office, dans une certaine mesure, de cas d'école d'un pays dont l'agriculture industrialisée s'est retrouvée soudainement contrainte par une pénurie de pétrole et est régulièrement citée dans les travaux de chercheurs étudiant l'impact du pic pétrolier sur l'agriculture(102, 173, 185, 186). La synthèse des études menées sur cet événement ainsi que ses travaux de recherche personnels menés sur place ont été présentées par Wright dans un livre universitaire en 2008 intitulé : « Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity, Lessons from Cuba »(185) sur lequel s'appuie largement le développement suivant.

En effet, à la suite de la révolution cubaine de 1959 et sous l'influence du bloc socialiste mené par l'URSS, Cuba a vu son agriculture s'industrialiser à un rythme soutenu jusqu'à atteindre un niveau d'intensivité comparable voire supérieur à celui des Etats-Unis(187). L'agriculture s'est mécanisée avec l'utilisation de pompes d'irrigation et un nombre de tracteurs passant de 9000 à 85 000 de la révolution à 1990 alors que le nombre de bœufs de

traits a chuté de 500 000 à 163 000(188, p. 4). L'énergie apportée dans l'agriculture cubaine par les bœufs et autres animaux de traits représentait 66,8% de l'énergie investie en 1960 contre 8,3% en 1990(189). L'usage d'engrais et de pesticides s'est intensifié avec une application d'engrais azotés de 192kg/ha ce qui est supérieur à l'utilisation dans un système américain similaire(187). La production de bétail, de produits laitiers, de porcs et de volailles s'est industrialisée également avec une part importante des concentrés dans l'alimentation. 80% des terres agricoles du pays étaient gérées par 180 fermes d'état et constitués principalement de monocultures étendues, dont seulement 18% produisait des cultures diversifiées(188, p. 4). Cuba a ainsi substitué les énergies investies dans son agriculture, passant d'une agriculture auto-suffisante et productrice nette d'énergie à une agriculture industrielle, reposant sur l'apport massif d'énergie d'origine externe au système.

La mise en place et le maintien de cette agriculture, le pays étant soumis à un embargo commercial total de la part des Etats-Unis depuis 1964 et ne possédant pas de réserves de pétrole propres significatives, dépendait de l'import de pétrole bon marché, d'engrais, de pesticides, de machines et de pièces détachées en provenance du bloc socialiste. En 1989, l'import d'engrais a augmenté de 900% par rapport à 1958 jusqu'à 1,3 milliards de tonnes, l'import de pesticides a augmenté de 200% et l'import de concentrés pour l'alimentation animale de 900% par rapport 1965, tandis que la valeur de la machinerie agricole importée a augmenté de 250% par rapport à 1970(188, p. 4). Avant la chute du bloc socialiste, 94% des engrais, 96% des herbicides et 97% des concentrés pour animaux utilisés étaient importés.

L'agriculture intensive ainsi mise en place avait cependant cela de particulier qu'elle ne permettait pas de nourrir directement la population. Les gains dus à l'export de sucre de canne et de tabac, massivement cultivés en monocultures, permettaient l'import de denrées alimentaires diversifiées et des éléments nécessaires au fonctionnement de l'agriculture. Ainsi l'export du sucre et de ses dérivés représentait 75% des revenus d'exportation du pays et 53% des terres arables étaient dédiées aux produits exportables tandis que 44% d'entre elles étaient dédiées à la production de nourriture domestique(188, p. 4). Malgré un gain de productivité dans ces dernières, 57-80% des protéines et 50-57% des calories consommées étaient importées. Ainsi les gains de productivités de l'agriculture servaient à alimenter une balance commerciale permettant secondairement d'importer la nourriture et les biens du pays. La sécurité alimentaire ne dépendait ainsi pas uniquement des gains de productivité de cette agriculture mais aussi du maintien de ce contexte commercial.

Le processus de substitution des énergies investies dans l'agriculture, son industrialisation avec l'usage intensif d'engrais, de pesticides, d'irrigation et de mécanisation alimentée par du pétrole importé font de l'agriculture cubaine des années 80 une agriculture similaire à celle de la France d'aujourd'hui et d'autre pays occidentaux à l'agriculture intensive. Elle diffère cependant en cela qu'elle n'est pas guidée par le libre marché mais par des directives étatiques et par son intégration précaire à des échanges commerciaux particuliers reposant sur un haut niveau de monocultures destinées à l'export et par une plus haute dépendance à l'importation d'un certain nombre de ses matières premières.

4.4.2. Chute du bloc socialiste et effondrement de l'agriculture

La chute progressive du bloc socialiste sur la période 1989-1990 a profondément bouleversé l'économie cubaine. Le pays, toujours soumis au blocus américain et à des sanctions économiques internationales a vu se réduire soudainement ses importations de manière drastique. Ainsi, entre 1989 et 1992, les importations de pétrole ont baissé de 53% (selon les études scientifiques, les données cubaines donnaient le chiffre de 75%), celles d'engrais de 77%, de pesticides de 63% et de concentrés pour animaux de 72% tandis que les importations de nourriture ont, elles, été réduites de plus de 50%(188). Cuba s'est alors retrouvée privée

de la moitié de son pétrole, d'une partie significative de la nourriture consommée dans le pays et de quantité d'éléments nécessaires au fonctionnement non seulement de son agriculture mais de son industrie. Les réserves du pays ont permis de retarder les conséquences les plus sévères de la déplétion de ces ressources jusqu'en 1993-1994 où le PIB national était près de 50% inférieur à celui précédant la crise.

Concernant le secteur de l'agriculture, la production nationale d'engrais ayant chuté de 72% de 1989 à 1995 couplée à la réduction des importations, il est estimé que la disponibilité en engrais pour les fermiers s'est réduite de 40 à 50%(188). Des pénuries importantes de pétrole empêchaient d'utiliser la machinerie et les monocultures privées d'intrant produisaient de très faibles rendements. La production agricole aurait globalement réduit de moitié entre 1989 et 1994, impactant les exports de sucre, également réduits de moitié. La production animale, en raison de la réduction de la disponibilité en concentrés, a également drastiquement chuté. De 1989 à 1992, les productions de porcs, de lait en poudre et de poulets ont été respectivement réduites de 69%, 89% et 82%(190, p. 6). Le pays s'est retrouvé ainsi plongé dans une grave crise alimentaire, l'apport calorique moyen de la population ayant été réduit d'au moins 30% par rapport aux années 80, les estimations se montrant assez variables, avec une réduction de l'apport en protéine estimée de 40%(188). Wright pensait que la disponibilité en engrais aurait été l'élément manquant principal pour les fermiers cubains, pourtant lors de ses recherches ces derniers mettaient principalement en avant le manque de pétrole, en particulier pour faire fonctionner les systèmes d'irrigation. 70% des fermiers interrogés attribuaient la chute des rendements à la réduction des apports externes à l'agriculture(191).

L'agriculture de Cuba sur cette période est un exemple radical de ce qu'une réduction sévère des investissements énergétiques externes peut avoir comme conséquences sur un système agricole industrialisé. Si l'effondrement économique du pays et la crise alimentaire est multifactorielle, il semble que la réduction des rendements agricoles dans cette première phase de la crise soit directement due à l'organisation industrielle du système d'agriculture et proportionnelle à la réduction de l'énergie investie dans celui-ci. Ce système a manifesté une très faible résilience à la crise en raison de sa dépendance aux énergie fossiles, en particulier au pétrole et aux engrais. Une transformation profonde du système agro-alimentaire cubain s'est révélée nécessaire dans les années suivantes afin de s'adapter à ce nouveau contexte de rareté des ressources et du pétrole.

4.4.3. Transformation de l'agriculture dans les années 1990

La période des années 90 a été nommée « période spéciale en temps de paix » par le gouvernement cubain, euphémisme désignant une sorte d'état d'urgence en raison de la grave crise économique et alimentaire du pays. En quelques années, l'organisation du système agricole a été profondément revue afin de s'adapter aux nouvelles conditions de rareté des ressources. Au cours de la décennie, le coût des engrais est passé de 3,6\$ à entre 11\$ et 25\$ tandis que les prix du pétrole ont plus que doublé(192, p. 7). Plus encore que le coût, ce sont les pénuries qui handicapaient le plus les fermiers, les disponibilités en pétrole ne comblant que 20 à 60% des besoins ressentis par ces derniers. Malgré l'existence de relations commerciales avec un certain nombre de pays et l'accroissement de l'exploitation du pétrole domestique, les fluctuations du prix du pétrole mondial et des tensions commerciales avec la Russie ont maintenu les pénuries de pétrole sur l'île tout au long de la décennie. Les quantités d'engrais et pesticides importés ont légèrement augmenté au cours de celle-ci mais restent bien inférieures à celles des années 80. La consommation nationale d'engrais ne représentant en 2001 que 20% de la quantité importée en 1989.

Les transitions entreprises au cours de la décennie de 1990 ont globalement permis de combattre l'insécurité alimentaire, tant au niveau de la quantité produite que de la distribution, et de faire remonter la production agricole (Figure 40), parfois à des niveaux supérieurs à 1989 comme c'est le cas pour le maïs. Certaines productions d'export comme celles de tabac, de citron et de café étaient remises sur pied à la fin de la décennie.

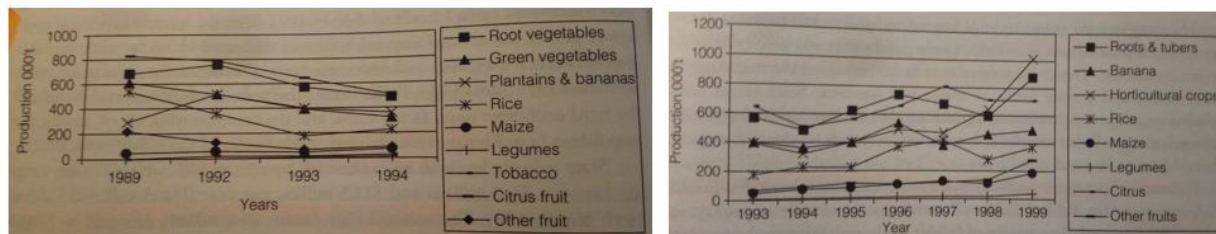


Figure 40 - Evolution de la production cubaine de certains produits agricoles entre 1989 et 1999 (Source : Wright, 2008)

L'apport calorique par habitant est remonté de 1860 kcal quotidiennes en 1996 à entre 2200 kcal et 2610 kcal en 2000. Si l'aide humanitaire et une réaaugmentation des importations ont participé à ce phénomène, la dépendance alimentaire du pays aux importations de nourriture a chuté de 70% dans les années 80 à 55% dans les années 2000, avec toutefois une hétérogénéité dans le type de produits encore importés (réduction de la dépendance aux importations de céréales, quasi disparition de la dépendance aux importations de légumineuses mais augmentation de la dépendance aux importations d'oléagineux et produits animaux)(193). L'élevage et les productions animales constituent le principal secteur à ne pas s'être relevé de la crise, principalement en raison du manque de concentrés importés à donner aux animaux et la production en 1998 est comparable ou inférieure à celle au plus fort de la crise(190). De plus, malgré les transitions mises en place, le nombre d'individus en sous-nutrition à Cuba a augmenté de 11% au cours de la décennie et de nombreuses conséquences de la crise sur la santé publique ont été par la suite relevées.

Globalement, une priorisation de l'allocation des ressources ainsi qu'une rationalisation importante de l'agriculture a été mise en place, tant à l'échelle de l'état dans sa planification qu'à celle des agriculteurs. Ainsi certaines cultures stratégiques se voyaient allouer plus de ressources en pétrole et en intrants tandis que de manière générale, les fermiers appliquaient les engrais encore disponibles avec beaucoup plus de parcimonie et précision qu'auparavant sur leurs parcelles, jusqu'à 0,11t/Ha, bien que 83% des fermiers interrogés déclaraient vouloir en utiliser plus.(192) L'agriculture pratiquée était par défaut proche des principes de l'agriculture biologique et de l'agroécologie, avec une croissance dans la diversification des cultures, le mélange de culture et l'optimisation de leur rotation, un labourage minimum des sols. Des engrais naturels étaient utilisés pour combler le déficit en engrais synthétiques, avec une utilisation des résidus de culture, notamment de canne, et du fumier dont la récolte et la distribution étaient parfois organisées à grande échelle. Des exploitations autrefois spécialisées dans l'élevage se sont diversifiées et ont utilisé leur fumier pour leurs cultures. Peu de données sont toutefois disponibles pour chiffrer l'intensité de ces utilisations.

L'essor spontané puis appuyé par l'état de fermes urbaines a permis aux urbains qui rencontraient des difficultés d'accès aux aliments périssables, notamment en raison des difficultés de transport et de stockage dues aux pénuries d'électricité et de pétrole,

d'améliorer leur alimentation en exploitant les parcelles cultivables en milieu urbain ou en construisant des structures ensuite de remplies de terre et exploitées de manière intensive et optimisée(194). Le développement de fermes urbaines contribuait en 1999 pour 5% de la production de nourriture domestique de Cuba mais fournissait 60% des légumes consommés dans le pays.

Ces nouvelles pratiques et la réduction des énergies externes disponibles ont nécessité une forte augmentation de la main d'œuvre et de ses compétences dans l'agriculture, favorisée par l'état via des incitations économiques, la mobilisation temporaire d'urbains pour du travail aux champs et l'obligation pour la jeunesse de réaliser un service dans l'agriculture plutôt qu'un service militaire(190). Sur cette période, les fermiers sont devenus une des catégories de population les plus aisées du pays et l'état a massivement développé la recherche scientifique et la formation de sa population sur le domaine de l'agroécologie. A la fin de la décennie, 20% de la population cubaine travaillait dans l'agriculture.

La distribution des terres a également été modifiée, l'état reconnaissant l'inefficacité de ses grandes exploitations, de nombreuses terres ont été accordées à qui souhaitait travailler dans l'agriculture et des modèles de coopératives agricoles se sont fortement développés. Ainsi, alors que 70% des terres agricoles étaient exploitées par des fermes d'état en 1989, ces fermes n'exploitaient plus que 32% des terres en 1994(189). 42% des terres étaient alors exploitées par de plus petites coopératives autonomes, les décisions étant décentralisées bien que les grandes lignes de la production et un encadrement des prix étaient décidés par l'état. La surface des terres cultivées a augmenté modestement de 10% lors de la décennie et la proportion des terres dédiées à l'export sur les terres dédiées à la consommation domestique est restée sensiblement la même. Ce sont les techniques d'agricultures qui semblent donc avoir principalement évolué.

4.4.4. Résurgence de la traction animale

Une évolution particulièrement intéressante et l'une des premières à être mise en place concerne l'usage des bêtes de traits. Il fallait en effet trouver une substitution à la force de traction des tracteurs dont l'usage était restreint par la pénurie de carburant et dès le début de la crise un programme national d'élevage mis en place dès 1992 a mobilisé 100 000 taureaux à travers le pays afin de produire et d'entraîner 30 000 bœufs par an destinés à la traction animale(192). De 1990 à 1998, le nombre de bœufs est ainsi passé de 163 000 dans le pays à 385 000(189). Ils étaient utilisés pour le travail lourd sur la ferme et remplaçaient ainsi le travail de 40 000 tracteurs. Ils ne se substituaient pas complètement à la mécanisation mais la complétaient, et les fermes possédaient généralement un mélange de tracteurs et de bœufs, utilisant l'un ou l'autre selon le travail à réaliser(189, 192). Selon Henriksson et Lindholm (2000), l'utilisation de bœufs présente l'avantage de pouvoir moduler la taille de l'équipe de bœufs au besoin, de mieux travailler sur un sol trempé qu'un tracteur et est plus économique(189). Un tracteur est en revanche plus rapide d'utilisation et peut développer plus de puissance facilement, il nécessite également beaucoup moins de travail d'entretien mais est dépendant du coût et de la disponibilité en carburant. L'usage de bœufs de trait est plus approprié sur les petites exploitations, aussi selon Wright, 78% des animaux de traits se concentraient sur les petites formes d'exploitations cubaines non privilégiées en termes de ressources et occupant 15% des terres arables(192). Ce sont cependant ces petites coopératives et fermes privées qui produisent 40% de la production domestique de nourriture(195) et dont la part croît au cours du temps(193). Les chevaux, et plus marginalement les mules et les ânes sont également utilisés pour la traction animale. D'après Starkey *et al.* (2002), contrairement aux bœufs, leur nombre s'est réduit lors des années 90 mais leur usage pour la traction s'est vu renforcé(195). En 2000 on comptait 400 000 chevaux

à Cuba (un cheval pour 28 habitants) et 35 000 mules majoritairement utilisés pour du travail léger, comme du transport de relativement longue distance en milieu rural comme urbain. 16 000 véhicules tractés par des chevaux ou des mules étaient enregistrés, pour le transport de marchandises, de produits agricoles ou pour un usage de transport public en milieu urbain.

Selon Henriksson et Lindholm, les principales difficultés initiales rencontrées dans l'utilisation d'animaux de trait étaient le manque d'animaux par rapport aux besoins, en raison de la latence de la transition, une vision négative des agriculteurs ayant vécu l'industrialisation de leur secteur et voyant l'usage d'animaux de traits comme un retour en arrière, l'alimentation par manque de fourrage et de pâtures et le manque d'infrastructure et de matériel adapté ainsi que de connaissances dans la conduite d'animaux de trait de la part des fermiers(189). Pour ce dernier point, Cuba a bénéficié du fait qu'une traction animale résiduelle existait encore et que les connaissances associées persistaient dans le pays. Les fermiers pratiquant cette activité ont été mobilisés pour la formation des agriculteurs et l'éducation universitaires des agriculteurs et des vétérinaires incluent désormais la traction animale. Les problématiques concernant les animaux de trait concernant le vétérinaire sont donc la formation à leur conduite, la gestion de l'alimentation de travail intense encore méconnue, et la santé des animaux. Une clinique vétérinaire est présente dans presque chaque village et offre des services et des soins peu coûteux, ce qui permet une bonne disponibilité des vétérinaires.

4.4.5. Leçons à tirer et limites de leur applicabilité en Europe

Wright rappelle qu'il existe un consensus global sur la nécessité de profonds changements au sein de l'agriculture afin d'adresser les difficultés causées par le pic pétrolier et le changement climatique(196). La « période spéciale » de Cuba ne fait en aucun cas office d'un modèle prédictif des effets du pic pétrolier sur un pays mais, celui-ci ne s'étant pas encore produit, offre un recul rare et précieux sur ce que les conséquences d'une réduction de la disponibilité en ressources peuvent avoir comme impact sur un pays à l'agriculture industrialisée, avec une réduction de la disponibilité en pétrole, en engrais et autres matériels. Il permet également de sortir des conséquences théoriques segmentées par secteur en incluant les impacts indirects des difficultés économiques traversant l'ensemble du pays causées par les pénuries sur le système agro-alimentaire, le système national complet étant secoué par la crise.

L'exemple de Cuba illustre la vulnérabilité d'un modèle agricole reposant sur des investissements d'énergie externe à une raréfaction de ces sources d'énergie, ayant comme conséquence directe et immédiate la baisse du surplus agricole. Il montre également ce à quoi ressemble un modèle alternatif d'agriculture efficace, quoique moins productif, largement privé de ces ressources et se reposant à nouveau sur l'utilisation d'énergie interne à son propre système. Les principales caractéristiques qui en ressortent sont l'usage de techniques d'agroécologie, une réduction de la taille des exploitations, la diversification et l'augmentation de la complexité des cultures, la hausse du travail humain nécessaire et des connaissances techniques requises, l'utilisation organisée à grande échelle de fumier et de résidus de culture comme engrais naturels, l'association de travail mécanique fourni par les machines et par les animaux de trait et une réduction drastique des productions animales.

Par comparaison avec la problématique du pic pétrolier, le cas de Cuba est un exemple radical de déclin de disponibilité des ressources avec une réduction de moitié de son approvisionnement en pétrole se produisant en quelques mois. Le rythme du déclin suivant le pic pétrolier en Union Européenne devrait être beaucoup plus progressif, s'accroissant avec le temps et une réduction de moitié de l'approvisionnement ne devrait pas se produire avant plusieurs décennies. De plus, Cuba s'est retrouvé privée de l'ensemble de ses ressources de

manière simultanée là où une réduction première de la disponibilité en pétrole entraînerait certainement une réduction de la disponibilité des autres ressources lui étant dépendantes mais découplée dans le temps. Le pic pétrolier offrirait alors certainement plus de temps à l'Union Européenne pour adapter son système d'agriculture et éviter les conséquences dramatiques visibles à Cuba. Cependant, comme le soulève Wright, la vitesse de mise en place des transitions entreprises à Cuba a été favorisée par un modèle politique très centralisé et planificateur ayant des objectifs sociaux. Les efforts de transition n'étaient pas dilués par un secteur privé où des intérêts individuels contradictoires peuvent coexister(196). Dans une Union Européenne au modèle libéral, une plus grande inertie face au déclin de pétrole peut être attendue avant qu'un changement organisé et cohérent se produise. Wright note par ailleurs que même dans le cas de Cuba, les décisions les plus importantes n'ont été prises qu'après la déplétion des stocks, quand bien même la crise était prévisible.

Enfin, l'exemple de Cuba est unique et soumis à un contexte économique, politique et environnemental très différent de celui existant aujourd'hui en Europe. La crise subie par le pays est par ailleurs relativement limitée dans le temps. En effet, à partir des années 2000 le contexte géopolitique changeant a permis à Cuba de réaugmenter ses importations de pétrole et l'agriculture du pays semble opérer un retour en arrière, utilisant à nouveau les ressources faciles d'utilisation lorsqu'elles redeviennent disponibles(196). Le déclin suivant le pic pétrolier sera lui tendanciellement continu et les adaptations n'iront pas de pair avec un retour progressif de la disponibilité en pétrole.

4.5. Perspective d'évolution en France à court puis long terme

4.5.1. Mise sous tension du système agro-alimentaire

Selon les projections, l'approvisionnement de l'Union Européenne en pétrole manifesterait un déclin de 10 à 20% sur la décennie 2030 par rapport à 2019 avec un rythme de déclin s'accroissant sur la décennie suivante(63). Au regard de la dépendance aux énergies fossiles que sont le pétrole et le gaz naturel de l'agriculture industrialisée française, des faibles perspectives d'amélioration des rendements et d'innovations techniques majeures et de l'exemple de la crise de Cuba, le pic pétrolier et le déclin dans l'approvisionnement en pétrole de l'Union Européenne prévu au cours des prochaines décennies aura de lourds impacts sur notre système agro-alimentaire. Dans un rapport de 2011, la FAO rappelle que la sécurité alimentaire des pays de l'OCDE est dépendante des énergies fossiles, que le coût de l'alimentation est corrélé à celui du pétrole et que l'ensemble de la filière de l'alimentation (de l'énergie investie dans la ferme à celui intervenant dans le transport et la préparation) consomme 30% de l'énergie primaire de la société(197). La sécurité alimentaire est ainsi très sensible à la disponibilité en énergie et la FAO considère les conséquences du pic pétrolier, à savoir la hausse du prix du pétrole et du gaz naturel ainsi que l'insécurité quant à l'état de leurs réserves, comme les principaux défis auxquels le système agro-alimentaire devra faire face.

Une croissance des prix du pétrole ou du gaz entraînera une croissance des prix des produits alimentaires et une rupture dans leur disponibilité en temps qu'énergie investie dans le système agro-alimentaire, entraînera une diminution proportionnelle du surplus agricole. Par ailleurs, comme le notent Harchaoui et Chatzimpiros (2017), l'agriculture française est fortement intégrée à une spécialisation spatiale internationale permettant des économies d'échelle(168). Que ce soit pour la production de viande ou de céréales, une production primaire française est généralement exportée pour raffinage dans un autre pays puis réimportée pour la consommation finale. C'est l'exemple des ateliers bovins naisseurs français ensuite exportés pour engraissement en Italie ou de l'importation de concentrés pour animaux produits à l'étranger pour la production animale française. La filière porcine de

Bretagne dépend ainsi à 80% des importations pour l'alimentation des animaux(168). Une rupture dans les systèmes de transport impliqués, une hausse de leur coût ou une diminution de la production ou de la demande des pays tiers réduira les capacités de production françaises.

L'exemple de Cuba montre qu'une telle agriculture, dépendante de l'investissement d'énergie externe et de relations commerciales d'import-export semble manifester peu de résilience à court terme à des chocs modifiant ces paramètres. Ainsi la croissance des prix et la déplétion de la disponibilité en énergie à investir consécutives au pic pétrolier entraîneront la décroissance de la disponibilité en nourriture, de l'abordabilité de celle-ci et de la viabilité économique des structures intervenant dans la chaîne de production alimentaire(197). En raison de l'accroissement de la demande parallèle en nourriture renforçant la tension sur le système, la FAO appelle à un changement de paradigme dans l'agriculture et la production alimentaire afin de les rendre les plus efficaces possibles, de minimiser les pertes et de substituer les sources d'énergies fossiles desquelles elles dépendent selon le mot d'ordre : « faire plus avec moins ». Que ce soit par anticipation ou par la matérialisation des contraintes physiques de la disponibilité en pétrole, l'agriculture des pays à l'agriculture industrialisée, incluant celle de la France, est amenée à se transformer en profondeur.

4.5.2. A court terme : renforcement paradoxal des structures les plus industrialisées

Neff *et al.* (2011), prévoient quatre évolutions possibles et non excluantes pour le système agro-alimentaire(174). La décroissance de la part du pétrole dans la production alimentaire, l'augmentation de l'efficacité énergétique de la production alimentaire et l'incorporation de sources d'énergie renouvelables, le changement des modèles de consommation alimentaires et la réduction des distances sur lesquelles la nourriture est transportée entre sa production et sa consommation.

Cependant, ils anticipent que la croissance initiale des prix, progressive, favorise dans un premier temps les importants complexes industriels. Ceux-ci seraient en effet plus à même d'endurer des difficultés financières et de réaliser de nouveaux investissements que des petites et moyennes exploitations et seraient également susceptibles d'augmenter leur production afin de profiter de la hausse des prix de l'alimentation au prix d'une consommation de pétrole accrue. Parallèlement, les difficultés économiques touchant les consommateurs réduiraient l'achat de produits alimentaires provenant de méthodes d'exploitation soutenables, généralement plus coûteuses, fragilisant ce marché alors même que les politiques gouvernementales pourraient favoriser dans un premier temps les structures industrialisées. Neff *et al.* rapportent de plus que des études tendent à montrer que la hausse du coût de l'énergie n'impacte pas le surplus agricole dans les premiers temps, les exploitations absorbant d'abord cette hausse de charge afin de maintenir leur production. Les manifestations de l'impact de la hausse du prix du pétrole et de la réduction de sa disponibilité sur le surplus agricole risquent d'apparaître avec une latence retardant les actions transformatrices de l'agriculture.

Ainsi, alors même que la nécessité d'anticiper les transformations à apporter à l'agriculture, différents facteurs semblent laisser penser que le modèle d'agriculture industrialisée persistera dans les premiers temps du déclin d'approvisionnement en pétrole, d'autant plus que celui-ci se manifestera de manière progressive, et que les premiers signaux ne suffiront pas à induire un changement.

4.5.3. Nécessité à long terme d'équilibrer la consommation d'énergie de l'agriculture par transition vers des sources d'énergie interne

A plus long terme, cependant, le déclin d'approvisionnement en pétrole impactera même les structures les plus industrialisées et la réduction du surplus agricole et l'accroissement de l'insécurité alimentaire risquent d'être d'autant plus importants que celles-ci pourront avoir partiellement supplanté les modes de production alternatifs(174). La France étant un important exportateur de produits agricoles, une réduction de son surplus agricole ne mettrait pas dans un premier temps en danger sa consommation domestique mais réduirait ses capacités d'exports, impactant sa balance commerciale et augmentant l'insécurité alimentaire des pays importateurs(165). Une réduction persistante de ce surplus finirait cependant par affecter la consommation domestique même. Par les contraintes de la rareté du pétrole ou par anticipation gouvernementale, l'agriculture commencera à transformer ses méthodes.

Harchaoui et Chatzimpiros (2018) argumentent qu'un système agro-alimentaire reposant presque exclusivement sur l'apport d'énergie externe afin de produire un surplus agricole voit ce surplus se réduire proportionnellement à la réduction de cet apport(165). Afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles et transformer l'agriculture en une source d'énergie nette pour la société, ils appellent à équilibrer la consommation d'énergie de l'agriculture française. Une balance énergétique positive signifie que l'énergie extractible de l'agriculture sous forme de biocarburant de première génération ou de seconde génération à partir des résidus de culture soient supérieure à l'énergie investie dans celle-ci, permettant la substitution des sources d'énergie et faisant de l'agriculture une source d'énergie nette pour la société. Actuellement, la seule partie du système agro-alimentaire exploité est le surplus agricole. De fait, l'entièreté de l'énergie contenue dans celui-ci représente l'équivalent de la biomasse nécessaire pour produire suffisamment d'énergie pour remplacer les sources fossiles. Cependant, dans une telle conversion, il ne reste rien à allouer à la production de nourriture. Il faudrait ainsi doubler l'énergie retirée de l'agriculture pour atteindre la neutralité énergétique en conservant le même surplus agricole.

Afin de produire de l'énergie à partir de sources internes au système agro-alimentaire sans puiser dans le surplus agricole, l'exploitation de la biomasse agricole lignocellulosique semble être prometteuse. En effet la lignocellulose contenue dans les résidus de culture non comestibles et dans le fumier est en effet une source particulièrement sous-exploitée d'énergie qui peut produire de l'énergie directement par combustion, par production de biocarburant ou par méthanisation en biogaz avec l'avantage de ne pas entrer en compétition avec la production de nourriture contrairement aux biocarburants de première génération(165, 198). Harchaoui et Chatzimpiros calculent l'efficacité de conversion énergétique de la biomasse en vecteurs d'énergie utilisables par l'agriculture (engrais, biocarburant, production de chaleur) et déterminent que celle-ci est d'environ 38%(165). Pour remplacer 100J d'énergie fossile par de la biomasse, il faut alors 100/0,38 Joules de biomasse soit 263 Joules. Cette source d'énergie primaire reste beaucoup moins performante que les énergies fossiles.

En se basant sur les efficacités énergétiques et les spécificités de l'agriculture française, Harchaoui et Chatzimpiros établissent quatre scénarios théoriques permettant d'atteindre sa neutralité énergétique(165). Ces scénarios supposent que l'ensemble du surplus agricole est alloué à la production de nourriture en raison de la compétition avec l'alimentation que représenterait une part de production de biocarburants de première génération. Ceux-ci accaparaient toutefois 23% du surplus agricole français en 2016. Ils assument la production de bioénergie à partir de l'exploitation des résidus de culture, notamment des pailles de céréales, et du fumier qui fournit cinq fois moins d'azote aux cultures que les engrais industriels en France(86). L'article pointe les difficultés techniques de récolter et traiter les

résidus et le fumier. Il réalise une estimation de l'énergie récupérable avec 30% et 70% de taux de récupération des résidus et 100% de récupération du fumier lorsque les animaux sont confinés (Figure 41). Il n'apparaît en effet pas réalisable de récupérer le fumier des animaux lorsqu'ils sont en extérieur et l'article inclut une incertitude sur le taux de récupération du fumier en bâtiment.

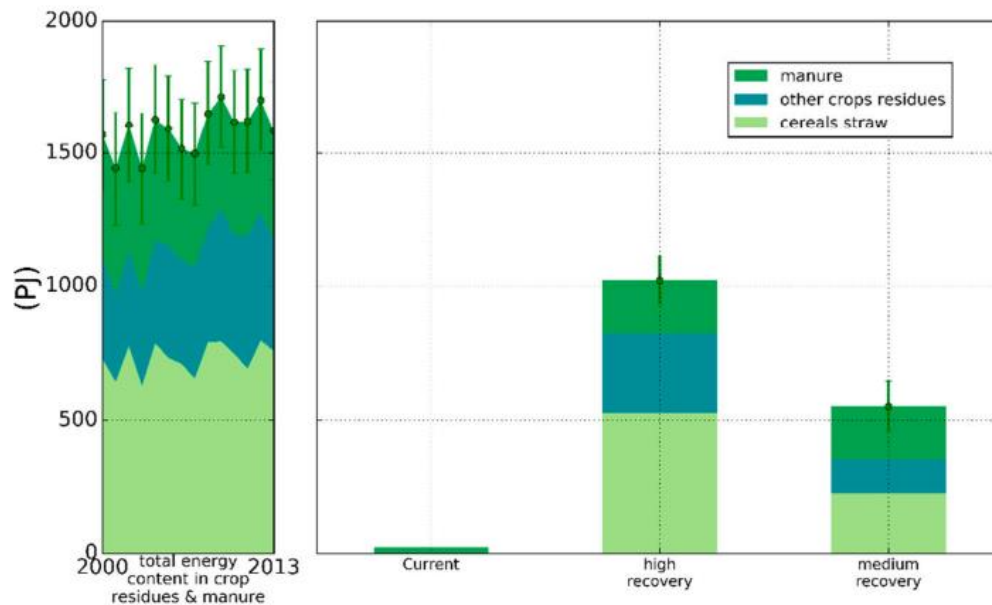


Figure 41 - Energie contenue dans les résidus de culture et fumier en France et estimations de l'énergie récupérable exploitable (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)

Les 4 scénarios impliquent ainsi une neutralité énergétique grâce à l'utilisation de résidus. Les scénarios S1a et S2a fonctionnent avec respectivement 30% et 70% de taux de récupération des résidus. Les scénarios S1b et S2b fonctionnent avec 30% et 70% de résidus mais suppriment la production de fourrage annuel et de concentrés pour l'alimentation animale, permettant d'augmenter la récupération de résidus et le surplus agricole en réduisant les pertes de biomasse induites par sa transformation par les animaux. Les résultats de ces scénarios en termes de surplus agricole et d'énergie primaire issue de la biomasse à apporter sont présentés dans la figure 42.

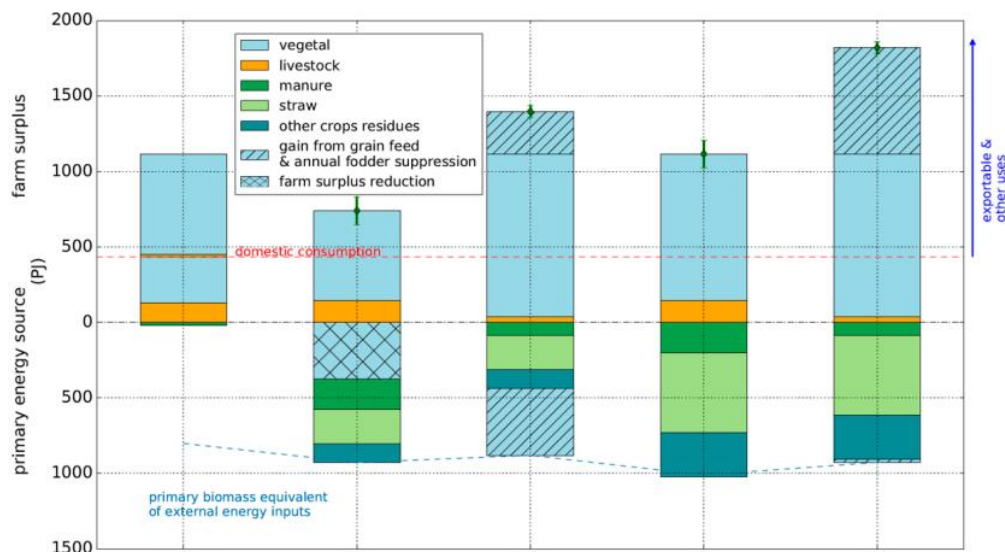


Figure 42 - Surplus agricole et apport d'énergie issue de la biomasse nécessaire par scénario comparés au modèle actuel (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)

Les seuls scénarios permettant l'augmentation du surplus agricole, en accord avec les recommandations de la FAO et l'augmentation de la population sont ceux supprimant les cultures destinées à l'alimentation animales (S1b et S2b). Le scénario S2a conservant celles-ci donne le même surplus agricole qu'actuellement mais nécessite un haut taux de récupération des résidus tandis que le S1a voit le surplus agricole se réduire de 35%, réduisant d'autant les exports de nourriture possibles et se rapprochant de la consommation domestique malgré des efforts permettant d'exploiter 30% des résidus de culture.

Ces scénarios très théoriques et absolus montrent les potentialités de l'usage des résidus de culture comme source d'énergie interne et le gain potentiel à réduire l'alimentation animale afin de dégager du surplus agricole et de l'énergie interne. Dans la réalisation réelle future, il semble cependant improbable que la mise en place de la récupération des résidus soit réalisée rapidement et de manière optimale, celle-ci nécessitant des recherches supplémentaires et la mise en place d'infrastructures encore peu existantes(198). Harchaoui et Chatzimpiros jugent les équilibres énergétiques présentés dans leurs scénarios très optimistes et suspectent une sous-estimation des coûts énergétiques nécessaires à la récupération des résidus et une surestimation des possibilités de récupération du fumier. La tendance la plus réaliste serait alors entre les scénarios 1 et 2 pour l'exploitation des résidus. Ces scénarios ne tiennent pas en compte de la vitesse de mise en place des transformations nécessaires et de la vraisemblance de leur entière complétion, ne donnant que des points cardinaux de comment pourrait se matérialiser une agriculture neutre en énergie et un ordre de grandeur de l'effort à accomplir au long terme. Il en ressort malgré tout la nécessité de réduire l'alimentation pour les animaux afin de conserver un surplus agricole équivalent ou supérieur à l'actuel tout en atteignant une neutralité énergétique. Plus d'études chiffrées de ce type permettraient de dessiner plus précisément les déterminants et les conséquences d'une agriculture visant la neutralité énergétique appliquées à l'agriculture d'un pays donné.

4.5.4. Utilisation ciblée de biocarburants de première génération

Il a été vu précédemment que la perspective de remplacer significativement le pétrole dans le secteur des transports par les biocarburants de première génération ne pouvait pas être raisonnablement envisagé pour des questions de sécurité alimentaire. Il semble cependant intéressant d'étudier si l'usage des biocarburants de première génération à destination exclusive de l'agriculture est soutenable en raison de l'ordre de grandeur moindre de la production nécessaire et du bénéfice d'avoir un moyen de substitution au pétrole dans ce secteur essentiel. Un tel scénario n'est pas inclus dans l'étude d'Harchaoui et Chatzimpiros sur la neutralité énergétique de l'agriculture française(165).

Tout d'abord il est à noter qu'un biocarburant est moins performant énergétiquement qu'un carburant fossile. En effet un moteur à combustion a un rendement d'environ 40 à 50%, c'est-à-dire qu'il transforme 40% de l'énergie primaire contenue dans le carburant en énergie mécanique avec un coût énergétique d'extraction initiale marginal. Or, la biomasse est transformée en biocarburant avec un rendement d'environ 30% avant d'être convertie en énergie mécanique par le moteur, ce qui donne un rendement final de 12-15%(165). Harchaoui et Chatzimpiros notent que ce rendement est du même ordre de grandeur que celui de la traction animale. Une bête de trait, toutes les dépenses énergétiques d'entretien prises en compte, transformerait la même biomasse en énergie mécanique selon un rendement de 8-10%. L'avantage énergétique des biocarburants de première génération sur la traction animale serait donc moindre mais un moteur fonctionnant au biocarburant aurait la capacité de produire beaucoup plus de puissance simultanée que des bêtes de trait et de produire un travail plus facile à mettre en œuvre.

Peu d'études semblent s'être attachées à détailler les besoins de production en biocarburants de première génération pour un usage direct sur l'exploitation agricole. Une étude de 2006 a modélisé la production sur place de trois biocarburants (biodiesel, bioéthanol et biogaz, du méthane produit à partir de la biomasse) pour répondre à la demande en carburant d'une ferme de 1000 ha avec rotation de cultures, d'agriculture biologique en conditions climatiques suédoises(199). La production de biodiesel nécessiterait 9,3% d'utilisation de la surface agricole pour une efficacité énergétique (énergie produite sous forme de biocarburant divisée par l'énergie investie dans cette production) de 7,6% tandis que la production de bioéthanol ne nécessite que 5,9% des sols pour une efficacité énergétique moindre de 2,8. Une partie non négligeable des surfaces agricoles devrait être allouée à la production du biocarburant de la ferme qui ne pourrait pas servir à la production de nourriture mais cela aurait l'avantage de rendre l'exploitation autonome en carburant. L'étude n'est cependant pas récente et repose sur une modélisation mathématique incorporant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et il n'est pas garanti qu'elle soit prédictive d'une mise en place réelle. De plus la taille de 1000 ha correspond à la plus petite taille d'exploitation qu'une petite infrastructure de production de biocarburant peut raisonnablement alimenter. La bonne application à la diversité des tailles et configurations d'exploitations agricoles n'est pas garantie.

Cependant la part modérée d'usage des terres nécessaire à l'alimentation de l'agriculture en biocarburant paraît encourageante et un modèle à l'échelle nationale, avec une éventuelle spécialisation d'exploitations pour la production de biocarburants à destination exclusive de l'agriculture devrait être étudié. Selon les calculs d'Harchaoui et Chatzimpiros, si l'entièreté des biocarburants produits en 2016 en France étaient réinvestis dans l'agriculture, ils répondraient à la demande de carburants pour les machines agricoles telles que quantifiée en 2013(165). Ces biocarburants accaparent cependant 23% du surplus agricole ce qui réduit d'autant le potentiel de production de nourriture et leur usage n'est actuellement pas ciblée vers l'agriculture. Si un usage des biocarburants ayant l'ambition de compenser les effets du déclin de pétrole dans le secteur des transports paraît vain et menacerait la sécurité alimentaire, un usage dirigé pour les carburants des machines agricoles semble avoir du potentiel et sa viabilité pratique dans différents modèles d'agriculture et climats mériterait d'être analysée.

4.5.5. Conflit entre alimentation animale et alimentation humaine

Il ressort des développements précédents que la réduction de l'alimentation animale est le levier le plus important dans le maintien d'un surplus agricole malgré une réduction des apports d'énergies externes reposant sur le pétrole et le gaz naturel. En effet, le coût énergétique de la production de produits animaux, dans un contexte de rareté des ressources, s'apparente alors à du gaspillage et la réallocation des terres arables vers des cultures directement comestibles par l'homme permettrait de grandement favoriser la conservation de surplus agricole et la production de résidus réinvestis dans l'agriculture, comme le montrent les scénarios S1b et S2b de Harchaoui et Chatzimpiros(165). Ainsi, chaque calorie de production animale représente une perte de surplus agricole potentiel et dans le contexte de mise sous tension du système agro-alimentaire et de croissance démographique mondiale, la FAO recommande de transitionner l'apport nutritionnel protéique des produits animaux vers les protéines végétales, de soja notamment(197).

Il semble alors vraisemblable et judicieux que les productions animales voient leur place se réduire de manière importante au cours de l'évolution du système agricole, à moyen ou long terme. L'exemple de Cuba présente en effet une agriculture approchant la neutralité énergétique mais incapable de maintenir une production animale significative(185). Parmi les

transformations contraintes de l'agriculture à venir, ce bouleversement du système d'élevage est celui qui impactera le plus la pratique vétérinaire rurale, modifiant le cheptel quantitativement et qualitativement ainsi que la structure d'organisation des filières de production animales.

4.6. Bouleversement du système d'élevage et de la pratique vétérinaire rural

4.6.1. La suppression des concentrés et des fourrages annuels pour les animaux de production

Selon Rowlinson(175) l'évolution du cheptel en zones tempérées va être contrainte par la croissance de la population humaine, la baisse des ressources en eau, la hausse des prix du pétrole suite au pic pétrolier et la hausse de la demande en biomasse agricole et son allocation, destinée soit à l'alimentation humaine, à l'alimentation animale ou à la production d'énergie. Harchaoui et Chatzimpiros montrent que la réallocation des cultures destinées à l'alimentation animale par production de concentrés ou de fourrage annuel est un des leviers les plus importants pour viser la neutralité énergétique et permettrait en France une économie de plus 800 PJ dans les scénarios S1b et S2b(165).

Or la composition de la ration est un facteur déterminant dans l'efficacité de conversion énergétique et la productivité des animaux d'élevage. En France, les céréales composent deux tiers de la ration des porcs et des volailles contre un tiers d'oléagineux et si l'herbe compose la majorité de l'alimentation des ruminants, les parts de céréales, d'oléagineux et de fourrage annuels ont triplé dans leur ration entre 1961 et 2010 (Figure 43)(168). La dépendance des ruminants à des terres autres que des prairies est passé sur cette période de 25% à 50%. Chez les ruminants, ces concentrés permettent d'apporter rapidement une quantité importante d'énergie et augmentent considérablement leurs performances.

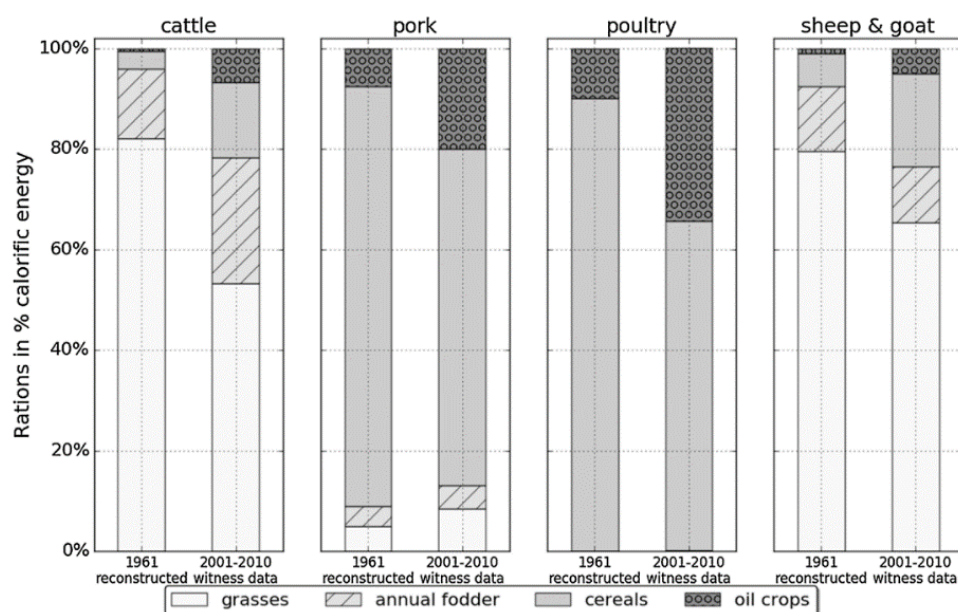


Figure 43 - Composition et évolution des rations de différentes productions animales en France (Source : Harchaoui et Chatzimpiros, 2017)

Porcs et volailles sont essentiellement granivores et il n'est pas envisageable de retirer les céréales de leur alimentation à grande échelle mais les herbivores comme les ruminants ou les lapins sont les seuls à pouvoir valoriser l'herbe des prairies et une alimentation sans concentrés avec uniquement du fourrage l'hiver est envisageable. Dans une agriculture visant

la neutralité énergétique, les herbivores sont les seuls animaux de production susceptibles de valoriser des ressources non directement consommables par l'homme telle que les prairies non arables ou les pâturages en zone montagneuse(173, 176). L'alimentation et les performances du cheptel bovin reposent cependant aujourd'hui sur l'exploitation de terres arables et sur les concentrés, ne plus leur allouer ces ressources implique des modifications certaines des filières bovines.

Il a été précédemment rapporté qu'en 1998 à Cuba, malgré une transition partielle vers une agriculture plus indépendante énergétiquement et avec moins d'usage de concentrés dans l'élevage, les productions de lait, de viande bovine et de volailles ont été réduites de 23%, 52,5% et 69,5% par rapport aux années 80(190). La suppression ou la réduction drastique des concentrés impactera différemment les différentes productions animales dans leurs performances et modifiera la pertinence de leur place dans le système d'élevage français.

4.6.2. Quasi-disparition des productions monogastriques

Les volailles et les porcs sont des animaux monogastriques ayant une capacité d'extraction de l'énergie contenue dans la cellulose bien inférieure à celle des ruminants. Leur efficacité de conversion énergétique et leur place dans le système d'élevage actuel repose sur une ration quasi exclusivement composée de céréales ou d'oléagineux détournés de la consommation humaine(168).

La réduction de la disponibilité en concentrés pour les animaux réduit proportionnellement le nombre de monogastriques qu'il est possible de nourrir et leurs performances. L'efficacité de cette filière reposant quasi exclusivement sur ce type de ration, il est vraisemblable que celle-ci soit amenée à s'amenuiser considérablement voire à disparaître si l'ensemble des concentrés à destination des animaux sont supprimés dans une agriculture visant l'efficacité et l'autonomie énergétique. Les scénarios S1b et S2b d'Harchaoui et Chatzimpiros impliquent un cheptel français presque exclusivement composé de ruminants où les productions de porcs et volailles ont décru jusqu'à n'être plus qu'une production marginale et dont l'alimentation provient des déchets alimentaires(165). Les auteurs supposent qu'une évolution réelle plus réaliste n'impliquera pas une disparition complète des concentrés et donc de ces productions mais permettra une moins bonne neutralité énergétique. En 2009, Holechek envisage également qu'à la suite du pic pétrolier, pour les mêmes raisons de disponibilités en énergie, de prix des céréales et de la compétition pour leur allocation, les porcs et volailles ne seraient élevés qu'à l'échelle de petites fermes et foyers en se nourrissant de restes et de déchets(176).

En France en 2021 selon les statistiques d'Agreste, plus de 15,7 milliards d'œufs de poule ont été pondus, plus de 865 millions de volailles dont 753 millions de poulets de chair et 23,3 millions de porcs ont été abattus(200–202). En 2016, le chiffre d'affaires hors-taxe de l'activité vétérinaire porcin-ovin-caprins-volailles, dominé par les monogastriques, représentait 5% du chiffre d'affaires total de la profession et 17,8% du chiffre d'affaires de l'activité envers les animaux de rentes(203). C'est une part significative de l'activité vétérinaire rurale qui devrait tendre à disparaître sur le long terme.

Cependant, en accord avec les prévisions de Neff *et al.* selon lesquelles les structures les plus industrialisées devraient être favorisées à court terme(174), il est possible qu'en cas de tension sur la disponibilité en concentrés les élevages de monogastriques, de volailles en particulier, soient favorisés par rapports aux élevages de ruminants dans un premier temps. En effet les monogastriques exploitent mieux les céréales que les ruminants(176) et les productions de poulet de chair et d'œufs et la production de porc sont les productions animales ayant la meilleure efficacité de conversion énergétique, respectivement de 19,3% et 17,7% environ(165) par rapport à l'ECE des productions bovines autour de 7%(168). Si peu de

céréales à destination des animaux sont disponibles ou si celles-ci sont coûteuses, elles seront plus efficaces allouées à des monogastriques qu'à des ruminants. Selon Leng, ces productions devraient ainsi profiter plus longtemps des concentrés encore disponibles que les ruminants et le modèle des « feed-lots » américains devrait décroître en premier en raison de sa mauvaise conversion des céréales en viande(173). Il anticipe qu'à terme, en revanche, les productions industrielles de monogastriques devraient s'effondrer en faveur d'une réémergence des herbivores, nourris au pâturage ou avec des résidus de culture.

4.6.3. La place de l'élevage bovin

4.6.3.1. Réduction majeure des rendements laitiers

Selon Leng (2008), dans les pays peu industrialisés où le bétail est nourri essentiellement avec le pâturage et des co-produits de l'agriculture, les rendements laitiers sont bien inférieurs au potentiel génétique des animaux, souvent inférieur à 1000L par lactation(132). En effet, Harchaoui et Chatzimpiros calculent pour la France que la production laitière est la production la plus affectée par la suppression des concentrés dans l'alimentation après celle des monogastriques(165). L'efficacité de conversion énergétique des productions laitières serait divisée par deux, chutant de 16,5% à 8%, ce qui témoigne de l'importance des concentrés dans l'optimisation des performances laitières des bovins. Or en France, 70% de l'énergie investie dans la production bovine est allouée à la production laitière contre 30% pour la production de viande. La viabilité économique et la pertinence des productions laitières sans concentrés seraient fortement remises en question par une telle chute de performance et il est probable que la filière laitière subisse une importante contraction. Les scénarios S1b et S2b d'Harchaoui et Chatzimpiros impliquent une réduction de 70% des productions animales basées presque exclusivement sur les ruminants(165). Leurs scénarios conservant la répartition de distribution énergétique de 70% et 30% entre productions de lait et de viande et la réduction d'ECE de production de lait étant de plus de 50% contre 20% pour la production de viande, la production laitière assumera la majorité de cette baisse.

Qualitativement, les races à haut potentiel génétique perdraient de l'intérêt à l'avantage des races mixtes(173) et les exploitations à haute concentration d'animaux seraient moins adaptées pour l'exploitation efficace de prairies non arables, plutôt situées en régions montagneuses. Il paraît alors vraisemblable que le modèle de production laitière intensif à spécialisation spatiale pratiquée en Bretagne et Normandie évolue vers de plus petites exploitations, en régions montagneuses, et soient intégrées à des exploitations de polyculture-élevage afin de profiter des co-produits de cultures.

La place du vétérinaire se verrait alors modifiée dans cette filière. Au niveau pathologique la chute des rendements laitiers et la réduction des concentrés verraient baisser la prévalence des maladies métaboliques cliniques et subcliniques. L'activité du vétérinaire se verrait reportée sur la gestion fine de l'alimentation telle que préconisée par Leng(173) et un rôle de conseil dans la conduite d'élevage afin d'optimiser au mieux la production de lait malgré l'absence de concentrés. L'élevage de races mixtes augmenterait les besoins en activité d'obstétrique par rapport à des laitières pures. Spatialement, le bassin d'activité laitier serait modifié, les régions de Bretagne, Normandie et Haute Loire détenant en 2020 52% des vaches laitières(204) se verraient peu à peu dépeuplées au profit d'une activité laitière mineure diffuse sur tout le territoire ou plus concentrée en région montagneuse, mieux pourvue en prairies non cultivables.

Paradoxalement, à la fin des années 90 à Cuba, la production laitière est la production animale s'étant le moins contractée(190). Ceci peut s'expliquer par une moindre optimisation des rendements laitiers dans ce pays, donc moins violemment affectés par la baisse de la

disponibilité en concentrés, ou par le fait que l'ECE du lait après suppression des concentrés reste bien supérieure à celle de la production de viande(165). Une stratégie d'adaptation pertinente pourrait être alors d'allouer les ressources de l'élevage principalement vers la production de lait malgré sa plus forte chute de rendement, cette production étant intrinsèquement plus efficace énergétiquement que celle de la viande. Cette tendance pourrait être perçue en France à plus long terme, une fois le premier choc économique passé lorsque l'agriculture se réorganiserait de manière rationnelle.

4.6.3.2. Relative résilience du modèle d'élevage allaitant français

Les protéines animales de l'alimentation humaine, selon plusieurs auteurs, sont amenées à être apportées de plus en plus par de la viande de ruminant au pâturage, au détriment des volailles et des porcs, avec une importance croissante de l'élevage extensif en prairies dans leur mode de production(173, 176). L'ECE de la production de viande bovine privée de concentrée décroît beaucoup moins que celle de la production laitière, de l'ordre de 20% en passant de 2,5% à 2% dans le cas de la France(165), ce qui en fait une production plus résiliente à la baisse de disponibilité en concentrés, bien que moins efficace énergétiquement. Ce cas de figure peut être assez spécifique de la France parmi les pays à l'agriculture industrialisée dans le sens où l'élevage allaitant français actuel est relativement extensif avec un rôle important de la mise à l'herbe dans l'alimentation et la croissance des veaux(205). La chute de performance serait certainement plus importante au sein d'un « feed-lot » américain.

Par ailleurs, selon FranceAgriMer la moitié de la production de viande bovine française est issue de vaches de réforme souvent issues du système laitier, seuls 28% proviennent de taureaux ou taurillons(206). L'élevage allaitant français est largement spécialisé comme naisseur avec une production de broutards destinés à l'export. En 2018, 1,4 millions de bovins étaient exportés dont plus d'un million de broutards. Or, le calcul de l'ECE de la production de viande française par Harchaoui et Chatzimpiros ne prend pas en compte l'engraissement des animaux exportés à l'étranger, mais uniquement des animaux abattus en France ou du poids vif au moment de l'export(168). La faible baisse des rendements cache alors l'usage important de concentrés dans cette phase d'engraissement non comptabilisée comme c'est le cas en Italie dans des unités d'engraissement intensif(207). L'élevage allaitant français étant largement spécialisé comme naisseur, une chute des performances d'engraissement due à la baisse de la disponibilité en concentrés pour l'élevage ou à la crise énergétique des pays importateurs réduirait probablement la demande en broutards français. FranceAgriMer note que 78% des broutards français exportés en 2018 l'étaient à destination de l'Italie et que les naisseurs français sont donc très dépendants de la situation italienne(206). Un engraissement domestique uniquement à l'herbe résulterait en de moins bonnes performances, qui mériteraient d'être quantifiées, et une telle chute de performances à l'engraissement, domestique ou des pays importateurs, inciterait à une forte réduction du cheptel.

La spatialisation de l'élevage allaitant français pourrait être amenée à évoluer. En effet les productions allaitantes françaises se situent souvent dans des bassins historiques. Par exemple un tiers des exploitations allaitantes se situent dans le nord du massif central (Allier, Nièvre, Creuse, Saône et Loire) où 5 à 30% des surfaces agricoles servent à la production de céréales pour l'alimentation des animaux(205). Les exploitations allaitantes se situent ainsi dans des bassins où il est probable que les animaux pâturent sur des terres arables qui seraient mieux allouées à la production de cultures destinées à la consommation humaine. Ils peuvent cependant jouer un rôle dans l'optimisation de l'utilisation des terres en pâturant sur les parcelles les moins praticables avec l'avantage, par rapport aux vaches laitières qui doivent être rentrées deux fois par jour pour la traite, de pouvoir mieux se disperser plus loin des bâtiments d'exploitation. Cependant les parcelles cultivables ne peuvent certainement pas

soutenir la population de bovins actuelle dans ces régions et celle-ci à terme devrait être plus diffuse, comme pour les vaches laitières, exploitant les terres non cultivables disséminées sur le territoire ou concentrées dans les prairies d'altitude.

Les qualités génétiques recherchées chez les animaux devraient peu évoluer, favorisant des animaux au meilleur rendement carcasse possible, et l'obstétrique devrait rester une composante majeure de l'activité du vétérinaire rural allaitant. Plus qu'auparavant encore en raison de la rareté des ressources, la survie des veaux serait primordiale et la médecine préventive des affections néonatales trouverait un intérêt encore renforcé. La clientèle risque cependant de s'étioler avec une concentration plus faible d'animaux sur un espace donné.

L'élevage allaitant français semble ainsi être apte à pouvoir conserver une place importante dans un système agro-alimentaire s'adaptant au déclin des ressources fossiles puisque qualitativement, il correspond déjà à un modèle d'élevage pertinent dans une société où la disponibilité en pétrole décline. Son niveau d'intensité et sa répartition devraient cependant être considérablement affectés sur le plus long-terme.

4.6.3.3. Changement d'échelle de la production

Les modifications initiales de performances des différentes filières de l'élevage bovin et l'évolution de la place de l'élevage français dans le commerce international, contraintes par un système agro-alimentaire s'adaptant à une réduction de ses apports d'énergie externe, risquent de rendre obsolètes les modèles d'organisation actuels de l'élevage bovin, dans l'ensemble relativement spécialisés avec une tendance à la concentration des animaux et des exploitations(208). Selon Leng (2005) et en accord avec plusieurs auteurs, en cohérence avec l'expérience de Cuba(185), il semble qu'avec la progression de la crise énergétique consécutive au pic pétrolier les systèmes d'agriculture industrialisés spécifiques d'une production vont petit à petit être remplacés par des systèmes de polyculture-élevage, à petite échelle, avec une main d'œuvre importante et employant des méthodes d'agroécologie pour une production mixte destinée en priorité à la consommation locale(173, 174, 176, 209). Ceci implique que la clientèle du vétérinaire rural basculera d'un ou deux interlocuteurs privilégiés par exploitation dont l'élevage, souvent à grande échelle, est la principale production, à des exploitations mixtes avec plus de travailleurs et moins nécessairement centrés sur les bovins. Le haut niveau de connaissances techniques nécessaires dans la mise en œuvre de méthodes d'agroécologie rend alors le rôle de conseil du vétérinaire sur la conduite d'élevage des animaux d'autant plus importante, les agriculteurs pratiquant l'élevage n'ayant pas nécessairement reçu une formation spécialisée dans celui-ci.

Une telle répartition des animaux, plus diffuse et moins spécialisée spatialement que précédemment, modifie du même coup la répartition des besoins en compétences vétérinaires. Le modèle des cliniques vétérinaires de plus en plus concentrés avec disparition des pratiques à petite échelle pourrait ne plus être adapté au maillage territorial nécessaire(145). A Cuba selon Henriksson et Lindholm (2000), après la crise des années 90, des cliniques vétérinaires se trouvaient dans presque tous les villages afin d'assurer la disponibilité des services vétérinaires qui étaient prodigués à des prix très abordables(189). La baisse de la part relative de la valeur des animaux dans une exploitation en polyculture-élevage associée à une exigence de performance dans la production agricole pourrait contribuer à une baisse nécessaire du coût des services vétérinaires et donc des revenus des praticiens, au profit cependant de la soutenabilité de l'agriculture.

4.6.4. Emergence d'une filière de traction animale et d'un cheptel de trait

L'exemple de Cuba montre que le report partiel de la traction nécessaire aux activités agricole sur les animaux s'est produit dès les premiers moments de la crise afin de pallier les pénuries de carburant(185). En effet, l'alimentation de bêtes de trait permet une conversion intéressante de la biomasse produite de manière interne au système en énergie technique et la traction animale est souvent incluse dans les composantes d'une agriculture soutenable et indépendante des énergies fossiles(102, 165, 174). Le rendement énergétique de la conversion de la biomasse par un animal afin de produire de l'énergie mécanique est du même ordre que le rendement de la conversion de biomasse en biocarburant puis en énergie mécanique par un moteur(165). Selon Henriksson et Lindholm, si un tracteur permet de développer beaucoup plus de puissance plus rapidement, la conduite d'animaux de traits présente l'avantage d'être plus modulable, et donc énergétiquement plus optimal, et plus économique(189). A plus ou moins long-terme il paraît ainsi vraisemblable de voir émerger une filière de traction animale dans l'agriculture française.

A court terme, dans un contexte où les agriculteurs tendent à être lourdement endettés pour les investissements notamment en machines agricoles(210), l'avantage économique des bêtes de trait pourrait permettre de soulager les petites exploitations subissant la hausse des prix consécutives au pic pétrolier et pallier d'éventuelles insuffisances de disponibilité de carburant. Si la traction animale était inégalement répartie à Cuba, plus fortement utilisée dans les petites et moyennes exploitations, l'ensemble de l'agriculture et le réseau de transport également y faisaient appel, en association avec les tracteurs habituels selon les besoins(189). Aussi, à plus long-terme il est probable qu'un cheptel de trait permette de réduire les besoins en carburant et permette une allocation rationnelle de la biomasse entre biocarburant et nourriture pour la traction animale selon les besoins pour l'ensemble du système agro-alimentaire.

Les sols humides et rouges de Cuba ainsi que les fortes températures faisaient du bœuf l'animal de trait de choix pour le travail lourd(189). Les conditions européennes sont différentes et un nombre relativement équivalent de bœufs et de chevaux de traits étaient historiquement utilisés des animaux de traits dans l'agriculture française du XIXe siècle avec 72% des chevaux adultes utilisés dans l'agriculture en 1861(211). L'émergence d'un cheptel de trait français mixte composé de bœufs et de chevaux de travail représenterait une nouvelle filière d'intérêt vétérinaire avec ses spécificités que la profession devrait apprendre à prendre en charge et une évolution vers le travail de la filière équine. L'expertise vétérinaire interviendrait à plusieurs niveaux.

La première problématique posée est la formation à la conduite de trait. Cuba bénéficiait d'un savoir préexistant dans la conduite d'animaux de trait et toujours mis en œuvre dans certaines parties de son agriculture avant la crise(189). Les fermiers compétents ont ainsi pu être mobilisés pour la formation des autres et l'université cubaine éduque à la traction animale les agriculteurs mais également les vétérinaires. En France ce savoir n'est plus du tout mis en pratique et il sera nécessaire de le réacquérir et de former les acteurs de l'agriculture. Il serait pertinent pour les vétérinaires de s'inclure dans cette formation dès le départ afin de pouvoir par la suite conseiller efficacement les éleveurs voire intervenir dans leur formation. Les compétences du vétérinaire paraissent également utiles, par la connaissance de la physiologie et de la biomécanique des animaux, dans la recherche universitaire en vue de mettre au point et d'améliorer les techniques de traction animale.

Henriksson et Lindholm rapportent les difficultés des cubains à nourrir correctement leurs animaux de trait, en raison du manque de concentrés et de pâtures mais aussi d'une méconnaissance de l'alimentation de travail intense des bœufs(189). La gestion optimale des

rations et de la croissance des bœufs et des chevaux de trait nécessite là aussi l'expertise du vétérinaire et pourrait représenter une partie significative de ses activités dans cette filière.

Enfin, la gestion de la santé des animaux relèverait évidemment des compétences du vétérinaire. A Cuba, les affections métaboliques étaient rares et les vétérinaires étaient plutôt confrontés à des affections aiguës comme des atteintes du système locomoteur ou les fractures de corne des bœufs mais aussi à des affections subcliniques affectant la productivité des animaux. L'application transversale des médecines équine et bovine seront nécessaires afin de traiter ce nouveau cheptel de trait.

4.6.5. Démassification du cheptel

Si les modifications de composition du cheptel sont difficiles à anticiper avec précision car extrêmement multifactorielles, une conséquence assez claire est la réduction de la taille en nombre de têtes du cheptel(173). Le scénario de neutralité énergétique d'Harchaoui et Chatzimpiros 1b et 2b manifestant les meilleures performances en termes de surplus agricole et de besoins énergétiques de l'agriculture impliquent une réduction de 70% des productions animales(165). Ceci signifie moins d'animaux susceptibles de nécessiter les services d'un vétérinaire. Afin de réaliser des économies d'énergie, l'attention sur chaque animal se trouvera renforcé et les compétences vétérinaires seront utiles pour optimiser au mieux les performances des animaux dans ce système contraint mais il n'est pas certain que ces aspects compensent la baisse brute de patientèle. Il est ainsi envisageable, outre les modifications qualitatives des services vétérinaires requis dans les filières d'animaux de production, que la masse de travail horaire vétérinaire globale nécessaire à l'accompagnement de l'élevage français décroisse, réduisant la demande pour cette partie de l'activité de la profession qui prendra une moins grande place qu'auparavant dans l'agriculture future.

4.7. Incertitudes quant aux tendances d'évolution

L'évolution de l'agriculture est soumise à de nombreux facteurs parfois imprévisibles. La date du pic pétrolier, la vitesse du déclin, les progrès techniques, la qualité d'adaptation des autres secteurs et les choix politiques et sociétaux macroscopiques sont susceptibles d'accélérer ou d'entraver certaines évolutions. Aussi les trajectoires possibles de l'agriculture décrites précédemment ne sont pas exhaustives et représentent un modèle d'adéquation entre les contraintes et les adaptations envisageables. La littérature explorant ces scénarios développe parfois des hypothèses d'adaptation totale et parfaite afin de dessiner un horizon mais chaque article ne se concentre que sur certains aspects de la problématique, une approche holistique se révélant certainement trop vaste et complexe à traiter. Il est vraisemblable que les évolutions décrites ne se matérialisent en pratique que tendanciellement, de manière incomplète et parfois inadéquate. Si des points cardinaux du futur de l'agriculture et de l'élevage peuvent être entrevus, la vitesse d'adaptation et l'organisation à chaque étape du système agro-alimentaire présente de grandes incertitudes et ne sauraient être précisément anticipées.

5. La possibilité d'une crise non maîtrisée

5.1. Des conséquences largement imprévisibles

5.1.1. Transversalité des impacts du pic pétrolier

Il a été développé précédemment que le pétrole intervient dans l'ensemble des secteurs de la société, à des degrés divers, et revête une importance particulière pour le secteur des transports qui lui manifeste une grande dépendance alors même qu'il articule l'ensemble des

secteurs de l'économie entre eux. Les conséquences du pic pétrolier impacteront ainsi simultanément de nombreux pans du fonctionnement de notre société. Chaque secteur étudié individuellement semble présenter des fenêtres d'adaptation plausibles, quoique souvent contraignantes et complexes à mettre en place. Cependant l'incertitude cumulée de la réussite de la mise en place adéquate de ces adaptations pour chaque secteur rend improbable que les transitions se produisent simultanément à la bonne échelle de temps dans l'ensemble de la société et permettent d'atténuer au mieux les impacts du pic pétrolier. Les secteurs de l'économie étant interdépendants, un secteur prenant du retard ou s'adaptant de manière inadéquate est susceptible à son tour d'entraver ceux qui lui sont connectés, alimentant ainsi des boucles de rétroactions négatives. Le secteur des transports en particulier est extrêmement préoccupant puisqu'il occupe une place centrale dans l'économie et la production et que, si la mobilité légère semble manifester des possibilités d'adaptation raisonnables, aucune technologie ne semble apte à maintenir l'intensité actuelle du transport de marchandises par la mobilité lourde lors des prochaines décennies.

Par exemple, les modalités d'adaptation du système agro-alimentaire précédemment décrites, dont l'objectif est de conserver un surplus agricole correct malgré la raréfaction du pétrole et du gaz naturel nécessitent une industrie apte à se transformer afin de produire des engrais de synthèse et des biocarburants avec des résidus comme matière première, mais aussi une mise en place dans les temps d'infrastructures permettant la récolte et le traitement de ces résidus. Tout cela requiert une souplesse économique permettant des changements profonds d'activité chez certains agriculteurs, un système d'éducation apte à former ces derniers aux techniques d'agroécologie et un secteur des transports encore suffisamment efficace pour permettre les échanges de matière première et d'équipements.

Cette transversalité des secteurs touchés par un déclin de pétrole et la vulnérabilité des transports sont des facteurs de risque d'une mauvaise adaptation globale au phénomène entraînant des crises imprévisibles et délétères. L'exemple de Cuba montre qu'un dysfonctionnement simultané de l'ensemble des secteurs d'un pays entraîne de graves conséquences sur le fonctionnement de l'économie et la santé et le bien-être des populations(188).

5.1.2. Intersection avec d'autres enjeux

Si ce travail concerne essentiellement les impacts d'un déclin de la disponibilité en pétrole induit par la raréfaction physique des réserves récupérables de cette ressource, il existe des connexions importantes entre la consommation de pétrole et d'autres enjeux essentiels. La problématique du pic pétrolier est en lien étroit avec le changement climatique et les enjeux environnementaux au sens large, comprenant la pollution des sols, l'effondrement de la biodiversité, la décroissance des ressources en eau et l'artificialisation des espaces naturels. La croissance démographique vient rehausser l'ensemble de ces enjeux par une hausse quantitative de la consommation et des impacts humains et le danger d'une insécurité alimentaire accrue.

Le changement climatique, causé par la consommation d'énergie fossile et le rejet de CO₂ dans l'atmosphère, est sans conteste l'une des problématiques majeures de notre siècle dont les conséquences impacteront fortement les sociétés humaines(212). Le pétrole, en tant qu'énergie fossile, contribue au changement climatique par sa consommation et par l'intensité de la productivité mondiale qu'il permet de par sa place centrale dans l'économie. Aussi, chercher à repousser le plus loin possible le pic pétrolier aggrave le changement climatique et ses conséquences, au point que des scientifiques appellent à laisser le pétrole dans le sol(91, 213).

Cependant, par nature puisqu'elles visent à substituer le pétrole comme source d'énergie ou à réduire cette consommation d'énergie, un certain nombre d'adaptations au pic pétrolier envisagées sont cohérentes avec des mesures de protection environnementale et de mitigation du changement climatique. Par exemple, en France, le scénario Afterres 2050 de l'association Solagro publié en 2016 envisage un modèle d'agriculture visant à réduire le dérèglement climatique, les pollutions et à être respectueuse de l'environnement et de la biodiversité tout en nourrissant une population humaine croissante(214). Les enjeux pris en compte par ce scénario n'incluent pas explicitement le pic pétrolier et la décroissance de la disponibilité en ressources fossiles précédant 2050. Le modèle d'agriculture y étant décrit va cependant largement dans le même sens que les bouleversements précédemment envisagés, avec une réduction des déchets, une généralisation de l'agroécologie, une transition vers des protéines végétales ou provenant de ruminants dans l'alimentation humaine et une modification du système d'élevage. Ce dernier implique une forte diminution des monogastriques et une désintensification de leur système d'élevage, un retour des ruminants à l'herbe et aux pâturages de montagne, la diminution de l'apport de concentrés et un retour aux races mixtes, le tout incorporé à un système de polyculture élevage. Dans ce scénario le cheptel bovin serait divisé par deux et les productions animales réduites de 40%.

En revanche, de nombreuses adaptations au pic pétrolier risquent d'entraîner des conséquences négatives sur les autres enjeux. La transition vers une mobilité électrique ou à piles à combustible induit une forte hausse de la consommation d'électricité, pour l'alimentation des batteries ou pour la production d'hydrogène par électrolyse. Produire cet électricité avec des ressources fossiles comme le charbon ou le gaz naturel, les énergies décarbonées comptant pour moins de 40% de la production d'électricité mondiale(26) aggrave considérablement le relargage de CO₂ au niveau mondial et donc le réchauffement climatique. La mise en place de sources d'énergie renouvelables pour cette production augmente la pression sur les minerais et vient s'ajouter à celle pour la production des batteries électriques tout en accentuant l'artificialisation des espaces(215). La fission nucléaire semble être le mode de production d'électricité avec le moins d'impact environnemental par unité d'énergie produite mais reste très controversée(216). De plus, si le nucléaire produisait près de 65% de l'électricité française en 2020, il ne comptait que pour environ 10% de la production d'électricité mondiale en 2018(26, 40). La vitesse et la capacité d'expansion de ces sources d'énergie dans le mix énergétique global est incertaine, spécialement dans un contexte de crise(186).

Les problématiques de dérèglement climatique, de protection de l'environnement et de pic pétrolier sont interconnectées. Si adresser ces problématiques appelle parfois à des solutions communes, d'autres mesures compensant le déclin de pétrole aggravent les conséquences environnementales et climatiques qui elles-mêmes réduiront les rendements agricoles, augmentant la difficulté à adapter le système agro-alimentaire. Les résultantes de l'ensemble de ces paramètres interconnectés est complexe à évaluer et peut amener à des mauvais arbitrages et une mauvaise adaptation à ces problématiques. Par ailleurs, le pic pétrolier étant l'enjeu à l'échéance la plus immédiate pour nos pays occidentaux et la plus contraignante sur le système économique et productif, le déclin de pétrole risque de sanctionner tout échec d'adaptation en temps et en heures aux autres problématiques. Des auteurs appellent à unir les problématiques de changement climatique et de pic pétrolier afin de coordonner les efforts vers une société avec peu d'émissions de carbone(91, 217–219).

5.2. Des avertissements ignorés par les économistes et la classe politique

Selon Wright, trop peu a été entrepris alors que les problématiques du changement climatique et du pic pétrolier sont discutées depuis des décennies dans le milieu

académique(196). En effet Hall et Day rapportent que depuis les années 70 la question de la rareté des ressources et la non-viabilité d'un système économique visant la croissance est mise en évidence, depuis le célèbre rapport de Meadows *et al.* (1972)(220), bien que dernièrement les discussions se portent plus sur les conséquences de l'exploitation des ressources sur l'environnement que sur la dépendance de nos sociétés à elles(83). Selon eux, les économistes, guidés par les théories économiques néoclassiques dont les limites ont été précédemment soulevées, ont eu tendance à rejeter les inquiétudes des scientifiques, arguant que les marchés permettent une allocation optimale des ressources, qu'aucun signe de rareté n'était visible dans la croissance des productions en pétrole et que l'innovation compensera la déplétion des ressources de meilleure qualité. Les impacts de chocs pétroliers ont ainsi été peu étudiés par les économistes pour qui la hausse des prix entraînera une incitation à utiliser plus efficacement le pétrole et à trouver des substituts, sans intégrer une non garantie de réussite(72).

Hall et Day déclarent que nos sociétés ne sont pas préparées à des défaillances majeures de plusieurs secteurs de notre système industrialisé car la possibilité de cette éventualité ne semble pas concevable par la classe dirigeante(83). North argumente avec d'autres auteurs que les élites mêlant classe dirigeante et économistes ont tendance à voir les problématiques du changement climatiques et du pic pétrolier comme des problématiques « post-politiques » qui relèvent d'un changement général de comportement sans que celui-ci passe par des décisions politiques précises et que l'économie du libre marché se montrera suffisamment créative pour générer des solutions(218).

L'écart entre les preuves scientifiques et les décisions politiques, appelé « science-policy gap » en anglais, est un phénomène largement discuté dans la littérature(221). Ce concept réfère au degré d'inadéquation des décisions politiques, quel que soit la problématique, avec les preuves et le consensus scientifique portant sur celle-ci(222). Différents facteurs sont avancés pour expliquer ce décalage. La classe dirigeante ne serait pas assez formée à la démarche scientifique, n'aurait pas assez de temps à accorder à la lecture et à la compréhension de rapports scientifiques dans son emploi du temps et serait guidée par des horizons de court terme et de logiques d'acceptation de la part de l'opinion publique plutôt que par un souci d'efficacité au long terme(222, 223). Une réduction de l'incertitude, mal appréhendée par la classe dirigeante là où elle fait partie intégrante de la recherche scientifique, serait nécessaire mais également de l'ambiguïté sur les causes d'un phénomène et de la meilleure manière d'y répondre afin de rendre les conclusions scientifiques plus audibles par la classe politique(222, 224). Des chercheurs argumentent cependant que ce n'est pas l'apport et la diffusion supplémentaire de preuves qui permettra de mieux influencer sur les décisions politiques mais une meilleure compréhension des processus d'élaboration de celles-ci, complexes et multifactorielles, afin que le monde scientifique puisse s'y intégrer de manière plus efficace(221, 224).

Dans le cas du pic pétrolier, Grant (2007) avance différents facteurs comportementaux contribuant à expliquer le manque de réaction et de préparation face au pic pétrolier(225). Il s'agit d'un phénomène nouveau et sans précédent dans l'histoire, et nos sociétés n'ont ainsi pas d'expérience pour l'appréhender. Le fait qu'il s'agisse d'un phénomène futur dont les conséquences se produiront avec un certain délai a tendance à réduire l'attention qui y est porté. Les incertitudes quant à la date du pic et les mauvaises estimations précédentes contribuent à réduire sa prise en compte correcte. Une certaine incertitude repose sur ses conséquences perçues et si, selon Grant, ceux familiers de l'économie de l'énergie perçoivent la gravité du phénomène, ce n'est pas nécessairement le cas de ceux n'ayant pas étudié précisément la question. Enfin, l'aversion au changement et la réticence des politiques à porter des nouvelles négatives sont également citées comme des facteurs entravant la

préparation au pic pétrolier. Bien que Grant s'accorde avec d'autres auteurs sur le fait qu'il est improbable qu'une réponse adaptée au pic pétrolier soit mise en place à temps, il argumente que la compréhension de ces comportements contribue à avancer vers la mise en place de solutions.

5.3. Opérer des transitions dans un contexte de crise

5.3.1. Contraction énergétique

Quand bien même l'adoption volontaire de mesures conséquentes afin de s'adapter au pic pétrolier adviendrait ou serait contrainte par le déclin effectif de la disponibilité de pétrole, celui-ci contraindrait fortement les marges de manœuvre envisageables. En effet, l'énergie quantifie les transformations physiques du monde et un déclin en pétrole signifie moins d'énergie disponible pour le transformer. Or, comme vu précédemment, de nombreuses adaptations nécessitent la mise en place de nouvelles infrastructures, le remplacement ou la réhabilitation d'anciennes, l'adoption de technologies avec un moins bon rendement énergétique et pas seulement la décroissance homogène de l'ensemble de l'activité humaine et de tous les secteurs de l'économie. Le déclin de la disponibilité de pétrole, progressif et marqué, sera concomitant avec les efforts de transformation des secteurs économiques. Ainsi, conceptuellement, à mesure que ce déclin avance, le potentiel de transformation se réduit, non seulement de manière absolue mais aussi en termes de vitesse de la transition.

A mesure que de moins en moins d'énergie est disponible, l'allocation de celle-ci doit se faire entre les dépenses d'entretien essentielles incompressibles soutenant notre système économique, une part croissante nécessaire à la récupération d'énergie future dont le TRE est décroissant et les investissements dans les transitions. La marge de manœuvre laissée par cette dernière part devient de plus en plus étroite à mesure que le déclin de pétrole s'installe(219). L'adaptation au pic pétrolier prend ainsi la forme d'une course contre la montre dans l'allocation des ressources pétrolières déclinantes aux efforts de transformation qui permettront de s'en émanciper, nécessitant la coordination de nombreux acteurs nationaux et internationaux à une échelle de temps relativement courte.

5.3.2. Récession économique

D'un point de vue économique, le PIB étant étroitement corrélé à la consommation d'énergie et de pétrole(17, 34), un déclin de son approvisionnement entraînerait une récession économique prolongée. Les disruptions précédentes dans l'approvisionnement en pétrole ont causé dix des onze dernières récessions des Etats-Unis(90) et le déclin suivant le pic pétrolier ne sera pas un phénomène temporaire mais tendanciel et s'accéléralant. Selon Tverberg la réduction de la croissance induite par une réduction de la disponibilité en pétrole engendrerait des crises financières par défaut de remboursement des dettes qui se répercuteraient sur l'économie réelle(77). La crise économique résultante entraînerait une inflation des prix de l'énergie et des biens de consommation, une réduction des investissements et du pouvoir d'achat, une hausse du chômage et donc un ralentissement net de l'économie et des transformations qu'elle est capable de supporter(77, 219). En effet, une économie en récession signifie que chaque année moins de biens et de services sont disponibles que l'année précédente. Couplé avec la réduction des investissements, l'économie possède alors de moins en moins d'outils et de souplesse afin de se réarranger au mieux. Tverberg et d'autres auteurs s'inquiètent de l'éventualité que ce phénomène entraîne à terme l'effondrement des institutions bancaires et du commerce international, en premier lieu pour les pays de l'OCDE et les pays importateurs de pétrole(34, 77, 186).

Que la crise économique soit brutale ou progressive, il est probable que tous les secteurs n'en subissent pas les effets de manière homogène et il est difficile d'anticiper les impacts précis sur l'activité vétérinaire. Les adaptations du modèle d'exercice de la profession vétérinaire, si elles ne sont pas entreprises précocement, devront cependant se produire dans ce contexte de crise et les structures vétérinaires doivent s'attendre à être impactées par celui-ci. Suite à la crise financière de 2008 qui a vu une baisse générale du pouvoir d'achat des ménages, le nombre de clients par vétérinaire au Canada a baissé jusqu'en 2009, puis remonté de 1% en 2010, avec une grosse hétérogénéité entre les régions, nombre d'entre elles manifestant encore une forte baisse(226). La Semaine Vétérinaire rapporte que le nombre de consultations vétérinaires a baissé aux Etats-Unis sur la période 2009-2010, 25% des vétérinaires américains constatant une baisse de plus de 5% de leurs visites et 30% une baisse de 1 à 5%(227). L'article rapporte succinctement les résultats d'une étude de Bayer ayant interrogé 2000 propriétaires et 400 vétérinaires qui observe que la récession et l'augmentation du prix des soins sont deux facteurs importants de cette décroissance aux Etats-Unis mais ne sont pas les seuls facteurs explicatifs de cette baisse. Il semble cependant qu'une perte de pouvoir d'achat des ménages qui peut être provoquée par une augmentation des coûts de déplacement, la hausse des coûts des soins et le contexte économique général réduit l'activité vétérinaire. Cette réduction risque d'être d'autant plus importante avec le déclin du pétrole que le phénomène ne sera pas transitoire et il est envisageable que, comme pour le reste de la société, les entreprises vétérinaires expérimentent une décroissance économique.

5.3.3. Instabilité politique

Une part importante des réserves de pétrole restantes, mais également d'autres ressources nécessaires à la substitution de celui-ci comme le cobalt, se situent dans des pays jugés politiquement instables(102). Selon Norouzi *et al.* (2020) des conflits armés entre les nations ou des ruptures commerciales sont susceptibles de considérablement modifier l'approvisionnement en pétrole des pays importateurs et d'accélérer les conséquences d'un déclin de pétrole dans ces pays tout en entravant les adaptations au pic pétrolier(62). Ils avancent que la montée des idées nationalistes dans la plupart des pays importateurs a tendance à mener le monde vers un scénario où les tensions géopolitiques s'aggravent et où les transitions nécessaires ne se réalisent pas.

L'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022 illustre la vulnérabilité de l'approvisionnement en énergie de l'Union Européenne à une crise géopolitique. La Russie représentant la principale source d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel de l'UE, les sanctions économiques ont eu pour conséquence l'augmentation des coûts du gaz naturel et du pétrole, se répercutant considérablement sur le coût du carburant(228). Une rupture dans l'exportation du gaz naturel de la part de la Russie exposerait l'Union Européenne à des pénuries dont la compensation complète serait matériellement difficile et économiquement très coûteuse. La Russie a en effet coupé l'approvisionnement de gaz naturel à cinq pays européens et réduit de 60% la distribution du système de gazoducs NordStream, conduisant l'AIE à alerter sur des risques d'effondrement de la disponibilité de gaz naturel en UE au cours de l'hiver(229). Le conflit est trop récent pour évaluer rigoureusement ses conséquences économiques précises mais une rupture de certaines chaînes d'approvisionnement et une inflation liée notamment à l'augmentation du coût de l'énergie est attendue(230).

Une instabilité interne des pays importateurs semble également à craindre à mesure que les conséquences économiques et sociales des récessions économiques et du déclin de pétrole dégradent la qualité de vie. Les conséquences de telles tensions internes sont imprévisibles sur la vitesse d'adaptation au pic pétrolier mais sont susceptibles de l'entraver à court terme.

5.4. Conséquence sur les plans de transition

S'adapter en temps et en heure au pic pétrolier afin d'en mitiger au mieux les conséquences nécessite un haut niveau d'anticipation et de coordination, tel qu'appelé par Campbell en 2006(231). Cependant, l'ensemble des facteurs précédemment exposés augmente fortement l'incertitude quant à la mise en place efficace de plans de transition conséquents. Un scénario dans lequel la crise énergétique résultante du pic pétrolier serait mal anticipée et accompagnée de cascades de conséquences délétères et imprévisibles semble raisonnablement envisageable.

6. Quelle représentation de ces enjeux par la profession vétérinaire ?

6.1. Discussions en cours autour du futur de la pratique vétérinaire

6.1.1. Les problématiques discutées

Si des auteurs déplorent que la problématique du pic pétrolier ne soit pas assez discutée au sein de la médecine humaine, la question est cependant soulevée dans plusieurs articles conséquents où ce concept est explicitement décrit(91, 97, 102, 160). Au sein de la profession vétérinaire, en revanche, les discussions portant sur le futur de la profession ne semblent jamais inclure les conséquences de ce phénomène.

Si quelques thèses décrivent et encouragent des pratiques écoresponsables au sein des cliniques et si l'une d'elle évoque rapidement le lien avec la croissance du coût de l'énergie et la déplétion des réserves de pétrole, celles-ci n'envisagent pas de phénomène de rupture brutale et rapide et la notion de soutenabilité de la pratique vétérinaire est rarement traitée dans la littérature(150, 161). L'étude de 2021 de Koytcheva *et al.* recherchant par algorithme tous les articles scientifiques revus par les pairs traitant de changement climatique ou de soutenabilité environnementale le milieu vétérinaire ne retient que trois articles ne mentionnant pas le pic pétrolier(96). La seule mention de ce dernier trouvée par une recherche non exhaustive au sein des revues vétérinaires françaises se trouve dans un court article datant de 2008 paru dans la Semaine Vétérinaire(232).

Chez les vétérinaires en exercice, la perception de ces enjeux ne semble pas très prégnante dans leur vision du futur de la profession. Un sondage réalisé par la Semaine Vétérinaire rapporte que plus d'un vétérinaire sur cinq ne croit pas au réchauffement climatique ou minimise ses conséquences(233) tandis qu'une étude américaine note que les vétérinaires sont moins impliqués dans les enjeux environnementaux que les professionnels de santé humaine(95). Un autre article de la Semaine Vétérinaire revient sur le rapport Afterres 2050 de Solagro, présentant un modèle d'agriculture allant dans le sens des bouleversements envisageables à la suite du pic pétrolier, et rapporte les commentaires d'un panel réduit de vétérinaires(234). Si la plupart s'accordent sur une future réduction de la pratique rurale et l'intérêt de ce genre de projection, ils manifestent une méfiance sur sa fiabilité et sont réticents à se projeter si loin dans le futur. L'un d'eux évoque l'idéalisme de l'étude et un autre ne croit pas à la viabilité économique du modèle proposé. Un vétérinaire interrogé déclare que les vétérinaires s'adapteront comme ils l'ont toujours fait depuis un siècle.

Les principaux sujets traités par les littératures vétérinaires française, britannique et américaine quant au futur de la profession semblent être la pénurie de vétérinaires ruraux sous l'angle de la difficulté d'orienter les étudiants vers cette voie(145, 235, 236), l'évolution du modèle de structure vétérinaire avec la place croissante des corporations et l'évolution du rôle du vétérinaire vers le conseil et la médecine des populations en pratique rurale(236, 237). Une étude de Woodward *et al.* interrogeant des agriculteurs et des vétérinaires quant au futur de l'activité vétérinaire bovine met en évidence six thèmes, incluant le modèle de structure vétérinaire, l'évolution de son rôle, son revenu, la collaboration avec les agriculteurs et les

attentes de la nouvelle génération. En revanche, la problématique du déclin des ressources et l'éventualité d'un bouleversement des filières animales ne sont jamais évoquées(237). Un article évoque les enjeux futurs des vétérinaires au sein de la production de volailles aux Etats-Unis sans évoquer les contraintes de la raréfaction des ressources qui pèseront sur cette filière(238).

6.1.2. Le projet Vetfuturs France : Vision du futur de la profession dressée par elle-même et angle mort du pic pétrolier

Le projet Vetfuturs France a été lancé en 2017 par le Syndicat National des Vétérinaires d'Exercice Libéral (SNVEL) et le Conseil National de l'Ordre des Vétérinaires (CNOV) afin de faire réfléchir les acteurs concernés sur le futur de la profession vétérinaire(239). La démarche est de « préparer le futur de la profession et des entreprises vétérinaires à la lumière des changements humains, sociaux, économiques, techniques et scientifiques qui impactent ou impacteront l'exercice quotidien en fixant des objectifs précis, mesurables, réalistes et acceptables pour les 15 ans à venir ». Les enjeux évoqués dans le livre blanc, paru en 2020, faisant la synthèse des réflexions des groupes de travail, se concentrent essentiellement sur l'évolution sociétale de la place de l'animal, un usage raisonné des médicaments, l'innovation et les nouvelles technologies. Les problématiques environnementales sont peu évoquées sauf pour considérer l'émergence de maladies favorisées par le réchauffement climatique et la raréfaction des ressources, en particulier du pétrole, n'est pas évoquée.

La vision dressée par le projet anticipe un accroissement du budget alloué aux animaux en milieu urbain en lien avec la croissance de l'attachement et de la considération portée aux animaux domestiques. En milieu rural un développement relatif des circuits courts et de l'agriculture biologique est perçu mais un bouleversement du système d'élevage ou la perte de vitesse des élevages de monogastriques n'est pas envisagée, ces derniers étant plutôt pris en exemple comme gage de stabilité de l'activité vétérinaire dans une région donnée et d'amélioration de sa technicité. Il est anticipé que l'activité vétérinaire rurale couvre un territoire de plus en plus large en raison de la concentration des exploitations agricoles, de leur diminution et de leur dispersion croissantes. Une importance particulière semble être donnée à l'innovation et aux nouvelles technologies et à la nécessité que les vétérinaires accompagnent cette révolution technologique. L'analyse des données par intelligence artificielle et l'essor de la télémédecine paraissent être des voies judicieuses afin de prodiguer un service médical à faible coût énergétique. L'usage étendu des technologies médicales portables, telles que des capteurs de paramètres physiologiques est cependant anticipé avec enthousiasme, et ce sujet a remporté un concours d'essai sur la vision du futur du métier de vétérinaire dans le projet VetFutures britannique(240). La conception, la fabrication et le gain uniquement individuel qui ressortirait de l'usage à grande échelle de ces appareils physiques ne semble cependant pas en phase avec la contraction attendue des ressources et des moyens de la clientèle initiées par le déclin de la disponibilité du pétrole. Cet intérêt pour les nouvelles technologies est à mettre en relation avec l'article de Hanlon et McCartney (2008) pour qui la santé sera plus impactée par les contraintes économiques et les inégalités résultant du changement climatique et du pic pétrolier que les progrès de court terme comme les innovations médicales(160).

Les conséquences pratiques du pic pétrolier semblent être un angle mort important de cette vision établie par la profession et risquent de rendre caduque les prévisions d'un tel projet assez rapidement. Si le projet Vetfuturs France semble s'être attaché à faire participer différents acteurs du domaine vétérinaire, il n'a pas inclus d'agronomes ou de spécialistes des questions énergétiques. Le rapport étudie l'avenir de la profession à l'horizon 2030, horizon préalable aux conséquences majeures attendues du déclin du pétrole ce qui peut également

expliquer que ce dernier ne soit pas évoqué. Ces conséquences devraient cependant se manifester peu après et il semblerait judicieux d'entamer les transitions nécessaires le plus tôt possible. Quelques évolutions allant dans le sens des adaptations à mettre en œuvre pour s'adapter au déclin de pétrole et à l'évolution de l'élevage, telles que la télémédecine et l'usage raisonné des médicaments, sont anticipées et encouragées mais de manière fortuite, à un ordre de grandeur moindre que nécessaire et pour d'autres motivations que celles des enjeux présentés dans ce travail. A l'inverse, la culture de l'innovation qu'il serait nécessaire de développer dans la profession vétérinaire selon le projet ne semble pas aborder les évolutions techniques de manière différenciée et adaptée aux besoins futurs de la médecine vétérinaire et des pans entiers des contraintes qui pèseront sur la profession après 2030 mais dont la mise en place est déjà en cours ne sont pas envisagés.

Les conclusions sur l'avenir de la profession vétérinaire rapportées par le projet Vetfuturs rendent une idée de la vision que la profession dresse elle-même de son évolution future. Celle-ci paraît s'inscrire dans la continuité d'une société de croissance et d'abondance énergétique. S'il est probable que les évolutions décrites soient en effet visibles jusqu'en 2030, la méconnaissance technique et l'absence de prise en compte des enjeux liés au pic pétrolier ou aux mitigations du changement climatique risque de maintenir un angle mort sur ces problématiques et d'empêcher la profession d'anticiper une rupture dans la logique de son organisation et de ses activités. Le projet Vetfuturs décrit un décalage entre les aspirations des étudiants et la réalité du terrain qu'il aspire à gommer. Il apparaît cependant que ceux-ci sont formés aux conditions d'aujourd'hui et non à celles qui risquent de déterminer l'essentiel de leur activité professionnelle future. Il semble alors pertinent pour la profession de se projeter plus loin que 2030, de se former à la problématique du pic pétrolier, parmi d'autres, dans une démarche scientifique transversale et de les considérer dans les prises de décision amenées à faire évoluer la profession.

6.2. Réflexion éthique sur le rôle à jouer de la profession vétérinaire dans l'accompagnement du pic pétrolier.

6.2.1. Une problématique largement systémique

Selon Frumkin *et al.*, un système de santé publique, duquel l'activité vétérinaire fait incontestablement partie intégrante, se doit d'être préparé à des contraintes et des ajustements induits par le pic pétrolier et avoir des plans en cas de pénuries brèves ou chroniques(102). La transversalité des impacts du pic pétrolier, touchant l'ensemble des secteurs de l'économie, nécessite une réponse coordonnée et une adaptation systémique. Un certain nombre de décisions relèvent de l'échelle macroscopique et nationale afin d'être pertinentes et efficaces. L'activité vétérinaire dépend en grande partie de décisions régissant l'économie et le secteur de l'agriculture et des mesures prises au sein de la corporation vétérinaire seule ne sauraient être suffisantes pour se prémunir de tous les effets du pic pétrolier. Cette responsabilité pèse principalement sur les acteurs du monde politique ou des institutions macroscopiques. La profession vétérinaire possède cependant en son sein un certain nombre d'institutions et d'organes professionnels d'intérêt, susceptibles de jouer un rôle à son échelle dans l'accompagnement du pic pétrolier et la préparation de la profession aux bouleversements de son activité. La possibilité d'un défaut de prise en compte à temps ou d'une mauvaise réponse à cette crise énergétique n'étant pas impossible, cet accompagnement devrait s'envisager, même en l'absence de directives gouvernementales, afin de protéger au mieux les vétérinaires et les activités de santé dont ils sont responsables des crises susceptibles de les impacter. Hanlon et McCartney anticipent le manque de préparation au problème par les mécanismes du marché ou les décisions politiques et argumentent que les professionnels de santé devraient être parmi les nombreux groupes à

adresser la menace du pic pétrolier urgemment(160). Frumkin argumente qu'avoir un état de préparation correct fait partie intégrante du rôle d'un système de santé et qu'une préparation aux conséquences du pic pétrolier doit être construite(102). A travers le monde, plusieurs projets d'analyse des conséquences du pic pétrolier sur la santé publique et de réponses à apporter ont été lancés(91). Le milieu vétérinaire pourrait également mettre en place de telles initiatives.

En effet, l'Ordre National des Vétérinaires indique sur la page d'accueil de son site internet qu'il est « le garant de la qualité du service rendu au public par les vétérinaires en exercice »(241). Il possède un rôle de représentation professionnel de la profession vétérinaire et de réglementation, en cela il peut présenter des problématiques et proposer des textes réglementaires au gouvernement. La profession est dotée d'associations professionnelles orientées par filière que sont la SNGTV (Société Nationale des Groupements Techniques Vétérinaires), l'AFVAC (Association Française des Vétérinaires pour Animaux de Compagnie) ou l'AVEF (Association Vétérinaire Equine Française), ou de syndicats avec le SNVEL et la FSVF (Fédération des Syndicats Vétérinaires Français). Ce sont autant de corps intermédiaires, au contact des vétérinaires en exercice et ayant une vision des problématiques vétérinaires à différentes échelles qu'il est possible de mobiliser afin d'analyser l'état et les vulnérabilités de la profession et de l'organiser en vue d'une adaptation aux enjeux futurs. Enfin les Ecoles Nationales Vétérinaires sont le lieu de la formation et de la recherche vétérinaire et devraient en ces qualités jouer un rôle central dans l'anticipation et la préparation à ces enjeux.

6.2.2. Responsabilité dans la formation des vétérinaires

Il apparaît que les étudiants sont formés selon la pratique vétérinaire d'aujourd'hui et d'hier et sont préparés à une activité et à des problématiques qui risquent de ne pas être celles auxquelles ils seront confrontés durant la majorité de leur exercice. En effet seuls deux cycles de formation complète séparent ce travail des années 2030 où le déclin dans l'approvisionnement du pétrole européen devrait solidement s'installer et il parait urgent d'adapter la formation à ces problématiques tant pour le bien être des futurs jeunes vétérinaires que pour la qualité du service de santé publique vétérinaire français. Les efforts de compréhension des enjeux et d'adaptation à ceux-ci ne devraient pas être du ressort de la volonté individuelle des vétérinaires de s'y intéresser, mais devraient faire partie intégrante de la formation et de leur conception de la profession.

Si les notions environnementales rentrent doucement dans le corpus d'étude, ce n'est pas encore le cas pour les notions de pic pétrolier et de disponibilité en énergie qui risquent pourtant de largement façonner l'organisation future de la société. Zamberlan *et al.* évoquent l'importance, en regards des problématiques du changement climatique et de la raréfaction des ressources, d'intégrer la notion de soutenabilité dans le cursus vétérinaire afin d'améliorer la sensibilité à cette notion des acteurs vétérinaires futurs, à l'interface entre l'environnement, les animaux et la santé publique(242). Cette position cruciale du vétérinaire nécessite un haut niveau de multidisciplinarité et une connaissance transversale d'enjeux pesant sur de nombreux secteurs interconnectés de la société. La première étape selon eux serait de modifier la formation des professeurs. En effet ceux-ci auraient tendance à trouver les sujets en lien avec la soutenabilité complexes à enseigner ou à les méconnaître et ainsi ne les intégreraient pas dans leur cursus. Une démarche de formation continue des professeurs hors de leur domaine d'expertise serait ainsi bénéfique.

De nouveaux modules pourraient alors être intégrés à la formation, traitant de soutenabilité et questions d'énergie, et ces notions pourraient apparaître en filigrane dans l'ensemble des cours, tel que conseillé par Zamberlan *et al.* Ceci contribuerait à améliorer les connaissances

et l'ouverture scientifique des étudiants par une approche scientifiquement transversale aux enjeux de ce siècle et d'augmenter l'acceptation des changements dans la profession à produire ou à accompagner. En effet, Wright rapporte quant au cas de Cuba qu'un frein important à la mise en place et à l'adoption par les agriculteurs de l'ensemble des mesures ayant permis de traverser la crise et de se diriger vers une agriculture soutenable était l'état d'esprit même des acteurs, favorables et confortables avec un système industrialisé(196)).

6.2.3. Responsabilité dans l'intégration de la profession au système agro-alimentaire

Le vétérinaire est intégré à différentes étapes de la chaîne de production alimentaire. Les activités du vétérinaire praticien à destination des animaux de production, du vétérinaire inspecteur de la santé publique, du vétérinaire travaillant dans l'agro-alimentaire sont autant d'activités listées dans le livre blanc du projet Vetfuturs agissant sur cette chaîne(239). Les vétérinaires sont ainsi au contact de nombreux acteurs du système agro-alimentaire en plus d'en être acteurs eux-mêmes.

Les vétérinaires praticiens sont les partenaires des éleveurs qui subiront en premier les conséquences du déclin de la disponibilité de pétrole. Ils devront s'adapter à l'augmentation des prix des concentrés et du carburant et au changement de paradigme dans l'organisation de l'élevage en un temps relativement court. En effet, de nombreux agriculteurs manifestent des réticences à suivre les recommandations environnementales modifiant l'orientation précédente productiviste de l'agriculture, notamment en raison des contraintes économiques impliquées et du changement de sens de leur profession(243, 244). Selon Preston et Leng ce sont les agriculteurs dans les pays les plus développés qui auront le plus de mal à adapter leur modèle d'agriculture aux contraintes du changement climatique et du pic pétrolier(245). Contrairement aux mesures environnementales incitées par les politiques agricoles, le déclin de pétrole pourrait directement contraindre l'évolution de l'agriculture mais si celle-ci est subie et non anticipée, elle risque d'impliquer une grande détresse économique et sociale chez les agriculteurs.

Dans une étude de 2017 de Duval *et al.* sur les attentes des éleveurs sur le rôle du vétérinaire en production laitière biologique, stade débutant d'un modèle agroécologique, les éleveurs rapportent que le vétérinaire n'était généralement pas impliqué dans la conversion à ce modèle, et regrettent son manque d'investissement dans l'agriculture en général(246). Les vétérinaires manifestent une difficulté à prendre en charge un rôle de conseil dans ces élevages et leurs services sont parfois perçus comme non adaptés ou trop chers, motivés par la vente de médicaments. Dans le cadre d'une évolution du système d'élevage, il apparaît de la responsabilité du vétérinaire d'accompagner proactivement les évolutions nécessaires sans être une charge pour les éleveurs, ce qui implique de modifier leur image auprès de ceux-ci et de s'adapter autant que possible à leurs contraintes économiques.

Afin d'accomplir ces objectifs, les modèles d'activités vétérinaires pourraient s'inspirer des Groupes Vétérinaires Conventionnés (GVC) réunis au sein de la Fédération des Eleveurs et Vétérinaires en Conventionnement (FEVEC) en Auvergne-Rhône-Alpes. Le conventionnement permet la suppression du paiement à l'acte par une cotisation annuelle, la formation et le conseil des éleveurs intégrés au modèle économique, une mutualisation des risques et des coûts pour les éleveurs et une transparence des tarifs vétérinaires avec une réduction des marges sur le médicament(247, 248). Celui-ci est alors abordé comme un outil de gestion de l'animal et non plus comme une source de rémunération. Ce modèle, qui s'est révélé utile en Auvergne-Rhône-Alpes dans la gestion de la désertification vétérinaire(145), paraît pertinent vis-à-vis de l'évolution du système d'élevage attendu et donne des outils afin de répondre aux difficultés économiques, de formation et relationnelles entre éleveur et vétérinaire. Il est

cependant à contrecourant de certaines habitudes et d'une tradition libérale qui semblent prégnantes au sein de la profession et génère nécessairement moins de revenus pour la structure vétérinaire qu'une pratique vétérinaire libérale intégrée à un système d'élevage plus intensif. L'extension des principes du conventionnement à d'autres régions passe par un changement de mentalité des vétérinaires comme des éleveurs et pourrait être adapté aux spécificités locales si nécessaire.

6.2.4. Responsabilité dans la recherche scientifique

Peu de travaux de recherches sont entrepris liant le pic pétrolier au secteur médical malgré l'importance de cet enjeu(97, 102) et le secteur vétérinaire en est encore moins pourvu. Il serait ainsi judicieux de décloisonner la recherche vétérinaire et d'orienter une partie des travaux vers l'analyse de la dépendance du secteur au pétrole, la réflexion sur son intégration future à l'agriculture française et l'élaboration de projections sur le futur de la profession en général. Selon Hess *et al.*, peu de données existent sur le coût énergétique de la santé, les transports, la consommation de plastique impliquée et la consommation de pétrole pour la production de médicaments(97). Eclaircir ces sujets de manière appliquée au domaine vétérinaire permettrait de mieux quantifier son niveau de dépendance au pétrole et de rendre l'analyse moins qualitative. Schwartz *et al.* appellent à établir un programme de recherche vers la problématique du pic pétrolier et de la lier aux problématiques environnementales et de changement climatique et ce malgré les incertitudes restantes sur les caractéristiques du pic pétrolier(91). Travailler sur les modèles d'intégration de la médecine vétérinaire à de nouvelles structures agricoles et d'élevage paraît également essentiel. Concernant la crise de Cuba, Wright qualifie le secteur scientifique de fer de lance dans l'adaptation de l'agriculture aux nouvelles contraintes(187). Ne pas attendre les crises pour orienter les recherches scientifiques vers des solutions permettrait de mieux les atténuer voir de les éviter en progressant dans la zootechnie des nouveaux modèles d'élevage. Le projet Vetfuturs montre que la profession possède les outils afin de réunir des groupes acteurs et des scientifiques afin d'explorer l'avenir de la profession. Il serait intéressant de multiplier ce genre de projet et d'étendre les domaines d'expertise et problématiques incluses.

Enfin, il paraît nécessaire de réaliser la médiation active des conclusions scientifiques, auprès de la profession et des étudiants en premier lieu. En effet, si les gestes individuels ou à l'échelle d'une clinique sont louables, une bonne connaissance des enjeux environnementaux et énergétiques les rendrait certainement plus efficaces et ciblés avec une notion de l'ordre de grandeur des efforts à produire. La médiation, des chercheurs vers le public ou bien à l'échelle interpersonnelle, paraît également importante. Les vétérinaires, du fait de leur formation scientifique et s'ils sont préalablement formés, sont qualifiés à vulgariser les conclusions scientifiques sur le sujet aux acteurs avec lesquels ils sont en contact, que ce soient les propriétaires d'animaux, les éleveurs ou les professionnels des autres maillons de chaîne de production alimentaire.

Résumé de la deuxième partie :

Les activités vétérinaires sont ainsi étroitement connectées à divers secteurs particulièrement vulnérables au déclin de pétrole. Elles manifestent une dépendance directe à la disponibilité en carburant et à la production de médicaments et de matières plastiques issus de la pétrochimie afin d'assurer une bonne continuité des soins et la santé économique des structures vétérinaires. Par ailleurs, les filières vétérinaires à destination des animaux de rente sont intégrées à un système d'agriculture et sont donc indirectement dépendantes de l'approvisionnement en pétrole et gaz naturel de celui-ci. Un déclin de l'approvisionnement

en pétrole de l'Union Européenne aura comme conséquence de réduire l'accessibilité spatiale et financière à la santé animale et bouleversera le système d'élevage. Les productions monogastriques devraient être amenés à considérablement se réduire et l'élevage bovin à perdre en intensité avec une répartition spatiale des élevages et des productions animales modifiée. Des adaptations sont susceptibles d'accompagner ce changement, en particulier l'usage professionnel de la voiture électrique, une certaine pratique de la télémédecine et un effort conséquent sur la gestion optimale du matériel et des consommables médicaux. Malgré cela, la qualité des soins et la demande en services vétérinaire semble être vouées à se dégrader. La profession doit s'attendre à ce que les services envers les animaux de rente demandés se réduisent quantitativement et évoluent qualitativement, avec l'émergence d'une médecine de travail liée à une nouvelle filière de trait et l'amoindrissement des pathologies de haute performance. Les difficultés pour appréhender et accompagner la problématique du pic pétrolier risque d'engendrer des crises et des phénomènes de rupture à court et moyen terme dont les conséquences socio-économiques pèseront fortement tant sur les éleveurs et les propriétaires que sur les vétérinaires. Il apparaît de la responsabilité de la profession d'utiliser ses institutions afin d'anticiper les chocs, de former et préparer au mieux les futurs vétérinaires à exercer selon les adaptations requises et d'orienter la recherche vers l'analyse de ces problématiques et l'exploration de solutions.

CONCLUSION

Ce travail s'est attaché à montrer le caractère essentiel de la ressource pétrole dans notre société. En effet, ses caractéristiques d'intérêt en font une source d'énergie formidable, aisément extractible, transportable et consommable. La massification de l'exploitation du pétrole depuis les années 50 s'est révélée être un facteur déterminant dans la mondialisation et dans l'essor exponentiel des sociétés occidentales et émergentes, en rupture nette avec les périodes précédentes. En effet, les produits raffinés du pétrole interviennent dans l'ensemble des secteurs de l'économie comme source d'énergie ou comme matière première. Or l'énergie est un déterminant nécessaire à l'économie. Et la consommation de pétrole, 31,6% de l'énergie consommée dans le monde, est étroitement corrélée au PIB. Son importance est fondamentale dans le secteur des transports où 92% des carburants utilisés sont issus du pétrole. Ce secteur peut être considéré comme le système sanguin de l'économie car il articule tous les autres secteurs et intervient tout au long des chaînes de production. En effaçant les distances il permet la massification des échanges.

Cependant, par sa nature géologique, le pétrole est une ressource non renouvelable à l'échelle de temps des sociétés humaines. Depuis le début de son exploitation, de nombreuses controverses sur la quantité de pétrole potentiellement extractible ont divisé les chercheurs. Le concept de pic pétrolier a été établi. Il renvoie au moment où le maximum de la production quotidienne est atteint avant que celle-ci ne décline.

Le pic de production du pétrole brut a été franchi en 2008 selon l'AIE mais l'essor de la production des pétroles dits non conventionnels a repoussé le pic pétrolier mondial tous pétroles confondus. La plupart des estimations récentes placent cependant ce pic pétrolier mondial dans la première moitié du XXI^e siècle et l'une des projections les plus fiables estime qu'il se produira en 2035. Il y aurait alors autant de pétrole disponible par être humain en 2060 qu'il y en avait en 1950. L'Union Européenne devrait subir le déclin de pétrole précocement. En effet elle importe 96% de son pétrole auprès d'un nombre réduit de pays producteurs dont 14 sur 16 ont atteint ou atteindront à court terme leur pic de production régional. La Russie en particulier fournissait en 2018 un tiers des importations européennes de pétrole. L'approvisionnement en pétrole de l'Union Européenne est ainsi estimé décliner par rapport à 2019 de 4% à 10% en 2030 puis de 10% à 20% en 2040 en s'accéléralant.

Un déclin dans la disponibilité de pétrole est inédit depuis son exploitation à l'échelle mondiale et ses conséquences sur l'économie et le fonctionnement des sociétés industrialisées risquent d'être majeures. En effet, les capacités de l'économie à substituer le pétrole pour un niveau de services identique sont très discutables, en particulier pour les transports pour lesquelles aucune énergie alternative n'est apte à complètement remplacer le pétrole. Que le phénomène soit maîtrisé ou non, il bouleversera profondément de nombreux secteurs de l'économie et affectera le métier de vétérinaire à différents niveaux.

Les recherches associant santé publique et pic pétrolier sont maigres et celles y liant la médecine vétérinaire presque inexistantes. Nous avons mené une étude de la dépendance directe et indirecte de l'activité vétérinaire à la ressource pétrole et proposé des alternatives envisageables afin d'anticiper certaines évolutions de la profession.

L'activité vétérinaire présente une dépendance directe aux transports pour les déplacements des travailleurs, de la clientèle, les déplacements professionnels et les livraisons. Si l'essor de la voiture électrique à batterie devrait permettre la continuité des déplacements professionnels, la réduction globale des possibilités de transports et la hausse de leur coût pour l'usage privé et les marchandises risque de dégrader l'accessibilité aux soins. La contraction du pétrole comme matière première pour la production de médicaments et de matériel plastique essentiels à la pratique médicale risque de mettre en tension l'industrie pétrochimique et d'augmenter les coûts de ses produits avec des risques

de pénuries. Une réorganisation du maillage et des pratiques vétérinaires permettrait de réduire au minimum les déplacements et l'utilisation de consommables. Néanmoins, une dégradation générale de la qualité des soins semble difficilement évitable.

Enfin, une partie significative des activités vétérinaires est dédiée aux productions animales. Or, en France et dans les pays industrialisés, l'agriculture est presque entièrement dépendante des énergies fossiles, en particulier du pétrole et du gaz naturel nécessaires à la mécanisation et à la production d'engrais. Une logique d'émancipation des énergies fossiles pour l'agriculture française tend vers une transformation profonde de l'élevage. Les productions animales se verraient globalement réduites jusqu'à 70%. Les productions monogastriques ne seraient plus énergétiquement viables et l'exploitation des ruminants, nourris essentiellement à l'herbe, se verrait quantitativement et spatialement modifiée, avec une relocalisation vers les prairies montagneuses ou non arables et une intégration à des exploitations agricoles diversifiées de moindre échelle. L'émergence d'un cheptel de trait constituerait une nouvelle filière d'activité vétérinaire. La quantité de services vétérinaire requise serait globalement diminuée et qualitativement bouleversée. L'émergence d'un cheptel de trait constituerait une nouvelle filière d'intérêt.

Les voies d'adaptation présentées dans ce travail impliquent un certain niveau de coordination et un usage rationnel des ressources. Elles restent soumises à un haut degré d'incertitude en raison de la transversalité des impacts du pic pétrolier, des incertitudes restantes sur ses caractéristiques et de l'intersection de cet enjeu avec les autres problématiques environnementales. La capacité de notre système économique à accompagner au mieux le déclin de pétrole à l'échelle de temps requise n'est pas garantie. Les conséquences de l'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022 ont souligné la vulnérabilité de nombreux secteurs de l'économie à une crise énergétique et les tensions géopolitiques sont des facteurs d'incertitude supplémentaires à prendre en compte. Ainsi des phénomènes de ruptures et de crises dans différents secteurs ne peuvent être exclus.

Malgré la gravité de l'enjeu sur lequel alertent nombre de scientifiques, la problématique du pic pétrolier est peu discutée au sein de la communauté vétérinaire et ne semble pas prise en compte dans la vision qu'elle se fait de son futur. La profession vétérinaire semble avoir plusieurs rôles pertinents à jouer. La formation des étudiants vétérinaires à une pratique s'inscrivant dans un contexte de contraction énergétique et de transformation de l'élevage paraît indispensable. Les différents organismes vétérinaires devraient œuvrer au service de cette transformation.

Bibliographie

1. SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. Chapter 2 - The Physical and Chemical Properties of Petroleum. In : SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. (éd.), *Elements of Petroleum Geology (Third Edition)*. Boston : Academic Press, 2015. pp. 13-39. ISBN 978-0-12-386031-6.
2. SPEIGHT, James G. 1.3 Definitions. In : *Handbook of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons, 2015. pp. 4-13. ISBN 978-1-118-36926-5. Google-Books-ID: Tto4DwAAQBAJ
3. IEA. *World Energy Statistics 2022 Edition- Database Documentation* [en ligne]. International Energy Agency, 2022. [Consulté le 24 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics>
4. PETROV, Alexander A. Chapter 1: General Characteristics of Petroleum Hydrocarbons Molecular and Group-Type Methodes of Analysis and Classification. In : *Petroleum Hydrocarbons*. Springer Science & Business Media, 2012. pp. 7-13. ISBN 978-3-642-71737-6. Google-Books-ID: 6wUrBgAAQBAJ
5. SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. Chapter 5 - Generation and Migration of Petroleum. In : SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. (éd.), *Elements of Petroleum Geology (Third Edition)*. Boston : Academic Press, 2015. pp. 191-253. ISBN 978-0-12-386031-6.
6. SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. Chapter 7 - Traps and Seals. In : SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. (éd.), *Elements of Petroleum Geology (Third Edition)*. Boston : Academic Press, 2015. pp. 321-375. ISBN 978-0-12-386031-6.
7. ZOU, Caineng, YANG, Zhi, ZHANG, Guosheng, HOU, Lianhua, ZHU, Rukai, TAO, Shizhen, YUAN, Xuanjun, DONG, dazhong, WANG, Yuman, GUO, Qiulin, WANG, Lan, BI, Haibin, LI, Denghua et WU, Na. Conventional and unconventional petroleum "orderly accumulation": Concept and practical significance. *Petroleum Exploration and Development*. 1 février 2014. Vol. 41, n° 1, pp. 14-30. DOI 10.1016/S1876-3804(14)60002-1.
8. SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. Chapter 9 - Nonconventional Petroleum Resources. In : SELLEY, Richard C. et SONNENBERG, Stephen A. (éd.), *Elements of Petroleum Geology (Third Edition)*. Boston : Academic Press, 2015. pp. 427-482. ISBN 978-0-12-386031-6.
9. FILGUEIRAS, Paulo R., SAD, Cristina M. S., LOUREIRO, Alexandre R., SANTOS, Maria F. P., CASTRO, Eustáquio V. R., DIAS, Júlio C. M. et POPPI, Ronei J. Determination of API gravity, kinematic viscosity and water content in petroleum by ATR-FTIR spectroscopy and multivariate calibration. *Fuel*. 15 janvier 2014. Vol. 116, pp. 123-130. DOI 10.1016/j.fuel.2013.07.122.
10. LAW, B. E. et CURTIS, J. B. Introduction to Unconventional Petroleum Systems. *AAPG Bulletin*. 1 novembre 2002. Vol. 86, n° 11, pp. 1851-1852. DOI 10.1306/61EEDDA0-173E-11D7-8645000102C1865D.
11. ZOU, Caineng. Part III : Unconventional Petroleum Miscellany. In : *Unconventional Petroleum Geology*. Elsevier, 2017. pp. 239-386. ISBN 978-0-12-812235-8. Google-Books-ID: TVEADQAAQBAJ
12. SANTOS, R. G., LOH, W., BANNWART, A. C. et TREVISAN, O. V. An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. septembre 2014. Vol. 31, n° 3, pp. 571-590. DOI 10.1590/0104-6632.20140313s00001853.

13. FAHIM, Mohamed A., AL-SAHHAF, Taher A. et ELKILANI, Amal. Introduction. In : *Fundamentals of Petroleum Refining*. Elsevier, 2009. pp. 1-9. ISBN 978-0-08-093156-2. Google-Books-ID: UcFsv1mMFHIC
14. CNRTL. Définition de ÉNERGIE. *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL)*. [en ligne]. [Consulté le 22 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.cnrtl.fr/lexicographie/%C3%A9nergie/0>
15. BALIAN, Roger. Conséquences énergétiques des principes fondamentaux. *Culture Sciences Physique*. [en ligne]. 19 janvier 2009. [Consulté le 23 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/Consequences-energetiques-principes-fondamentaux-Balian.xml>
16. JANCOVICI, Jean-Marc. Combien suis-je un esclavagiste ? *Jean-Marc Jancovici*. [en ligne]. 1 août 2013. [Consulté le 23 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/combien-suis-je-un-esclavagiste/>
17. STERN, David et CLEVELAND, Cutler. Energy and Economic Growth. *Rensselaer Working Papers in Economics*. 1 avril 2004. Vol. 0410, pp. 1-41.
18. BRENNAND, Timothy P. Natural gas, a fuel of choice for China. *Energy for Sustainable Development*. 1 décembre 2001. Vol. 5, n° 4, pp. 81-83. DOI 10.1016/S0973-0826(08)60287-2.
19. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Few transportation fuels surpass the energy densities of gasoline and diesel. *U.S. Energy Information Administration*. [en ligne]. 14 février 2013. [Consulté le 23 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9991>
20. AUZANNEAU, Matthieu. I - - 1945 - Germination. In : *Or noir: La grande histoire du pétrole*. La Découverte, 2021. pp. 13-28. ISBN 978-2-348-06754-9. Google-Books-ID: x6EQEAAAQBAJ
21. GUPTA, Ajay K. et HALL, Charles A. S. A Review of the Past and Current State of EROI Data. *Sustainability*. octobre 2011. Vol. 3, n° 10, pp. 1796-1809. DOI 10.3390/su3101796.
22. HALL, Charles A. S., LAMBERT, Jessica G. et BALOGH, Stephen B. EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*. 1 janvier 2014. Vol. 64, pp. 141-152. DOI 10.1016/j.enpol.2013.05.049.
23. STEFFEN, Will, BROADGATE, Wendy, DEUTSCH, Lisa, GAFFNEY, Owen et LUDWIG, Cornelia. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*. 1 avril 2015. Vol. 2, n° 1, pp. 81-98. DOI 10.1177/2053019614564785.
24. RITCHIE, Hannah, ROSER, Max et ROSADO, Pablo. Energy. *Our World in Data*. [en ligne]. 28 novembre 2020. [Consulté le 25 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
25. LAHERRERE, J. Forecasting future production from past discovery. *International Journal of Global Energy Issues*. [en ligne]. 1 janvier 2002. [Consulté le 25 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJGEI.2002.000961world>
26. IEA. *World Energy Outlook 2018* [en ligne]. International Energy Agency, 2018. [Consulté le 9 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
27. HAMILTON, James D. Understanding Crude Oil Prices. *The Energy Journal*. 1 avril 2009. Vol. 30, n° 2, pp. 1-28. DOI 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol30-No2-9.

28. SDES. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2020*. Service des Données et Etudes Statistiques, 2020. pp. 5-19.
29. IEA. Data tables – Data & Statistics. *IEA*. [en ligne]. 2020. [Consulté le 12 mai 2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables>
30. RIBEIRO, Suzana K., KOBAYASHI, Shigeki, BEUTHE, Michel, GASCA, Jorge, GREENE, David, LEE, David S., MUROMACHI, Yasunori, NEWTON, Peter J., PLOTKIN, Steven, SPERLING, Daniel, WIT, Ron et ZHOU, Peter J. Transportation and its Infrastructure. [en ligne]. 1 décembre 2007. [Consulté le 26 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://escholarship.org/uc/item/98m5t1rv>
31. MORIARTY, Patrick et HONNERY, Damon. Global Transport Energy Consumption. In : *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia*. [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd, 2016. pp. 651-656. [Consulté le 26 avril 2022]. ISBN 978-1-119-06635-4.
32. CURTIS, Fred. Peak globalization: Climate change, oil depletion and global trade. *Ecological Economics*. 15 décembre 2009. Vol. 69, n° 2, pp. 427-434. DOI 10.1016/j.ecolecon.2009.08.020.
33. LITMAN, Todd. *Evaluating Transportation Economic Development Impacts* [en ligne]. Victoria Transport Policy Institute, 2010. [Consulté le 26 avril 2022]. Disponible à l'adresse: https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:jqCAFRDyeUAJ:scholar.google.com/&hl=fr&as_sdt=0,5
34. BROWN, James H., BURNSIDE, William R., DAVIDSON, Ana D., DELONG, John P., DUNN, William C., HAMILTON, Marcus J., MERCADO-SILVA, Norman, NEKOLA, Jeffrey C., OKIE, Jordan G., WOODRUFF, William H. et ZUO, Wenyun. Energetic Limits to Economic Growth. *BioScience*. janvier 2011. Vol. 61, n° 1, pp. 19-26. DOI 10.1525/bio.2011.61.1.7.
35. GIRAUD, Gaël et KAHRAMAN, Zeynep. How Dependent is Growth from Primary Energy? Output Energy Elasticity in 50 Countries (1970-2011). *TSP*. 2014. pp. 1-21.
36. SOYTAS, Ugur et SARI, Ramazan. Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets. *Energy Economics*. 1 janvier 2003. Vol. 25, n° 1, pp. 33-37. DOI 10.1016/S0140-9883(02)00009-9.
37. NARAYAN, Paresh Kumar et SMYTH, Russell. Energy consumption and real GDP in G7 countries: New evidence from panel cointegration with structural breaks. *Energy Economics*. 1 septembre 2008. Vol. 30, n° 5, pp. 2331-2341. DOI 10.1016/j.eneco.2007.10.006.
38. ARORA, Vipin, HODGE, Tyler et LIDDERDALE, Tancred. Oil-Consumption-Weighted GDP: Description, Calculation, and Comparison. . 2016. pp. 16.
39. DE CASTRO, Carlos, MIGUEL, Luis Javier et MEDIAVILLA, Margarita. The role of non conventional oil in the attenuation of peak oil. *Energy Policy*. 1 mai 2009. Vol. 37, n° 5, pp. 1825-1833. DOI 10.1016/j.enpol.2009.01.022.
40. SDES. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021* [en ligne]. Service des Données et Etudes Statistiques, 2021. [Consulté le 3 mai 2022]. Disponible à l'adresse: <https://statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2021>
41. INSEE. Définition - Ressources naturelles. *Institut national de la statistique et des études économiques*. [en ligne]. 15 janvier 2021. [Consulté le 1 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2198>

42. HUBBERT, M. King. Nuclear Energy and the Fossil Fuel. In : *Drilling and Production Practice*. [en ligne]. American Petroleum Institute, 1 janvier 1956. [Consulté le 5 janvier 2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.onepetro.org/conference-paper/API-56-007>
43. PRIEST, Tyler. Hubbert's Peak. *Historical Studies in the Natural Sciences*. 1 février 2014. Vol. 44, n° 1, pp. 37-79. DOI 10.1525/hsns.2014.44.1.37.
44. CAMPBELL, Colin J et LAHERRÈRE, Jean H. The End of Cheap Oil. *Scientific American*. Vol. 278, n° 3, pp. 78-83.
45. BENTLEY, R. W. Explaining Peak Oil: What It Is, and Why It Happens. In : *Introduction to Peak Oil*. Springer, 2016. pp. 9-57. ISBN 978-3-319-26372-4. Google-Books-ID: 92vWCwAAQBAJ
46. SORRELL, Steve, SPEIRS, Jamie, BENTLEY, Roger, BRANDT, Adam et MILLER, Richard. Global oil depletion: A review of the evidence. *Energy Policy*. 1 septembre 2010. Vol. 38, n° 9, pp. 5290-5295. DOI 10.1016/j.enpol.2010.04.046.
47. WOOD, John H, MOREHOUSE, David et LONG, Gary R. Long Term World Oil Supply Scenarios. *Energy Information Agency*. 2004. pp. 7.
48. LYNCH, Michael C. Forecasting oil supply: theory and practice. *The Quarterly Review of Economics and Finance*. 2002. pp. 17.
49. MAUGERI, Leonardo. Oil: Never Cry Wolf--Why the Petroleum Age Is Far from over. *Science*. 21 mai 2004. Vol. 304, n° 5674, pp. 1114-1115. DOI 10.1126/science.1096427.
50. WELLS, Jim. *Crude Oil: Uncertainty about Future Oil Supply Makes it Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production*. . DIANE Publishing, 2007. ISBN 978-1-4223-1576-7. Google-Books-ID: Kkx7CJHWrm8C
51. MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE et DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DES MATIÈRES PREMIÈRES. *L'industrie pétrolière en 2004* [en ligne]. 2005. [Consulté le 5 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.vie-publique.fr/rapport/27254-lindustrie-petroliere-en-2004>
52. CAMPBELL, Colin J. et LAHERRÈRE, Jean H. The End of Cheap Oil. *Scientific American*. 1998. Vol. 278, n° 3, pp. 78-83.
53. BENTLEY, R. W., MANNAN, S. A. et WHEELER, S. J. Assessing the date of the global oil peak: The need to use 2P reserves. *Energy Policy*. 1 décembre 2007. Vol. 35, n° 12, pp. 6364-6382. DOI 10.1016/j.enpol.2007.08.001.
54. LAHERRÈRE, Jean. "Future of Oil Supplies". *Energy Exploration & Exploitation*. 1 juin 2003. Vol. 21, n° 3, pp. 227-267. DOI 10.1260/014459803769520061.
55. THE SHIFT PROJECT. *Possible déclin de l'approvisionnement en pétrole de l'UE d'ici 2030* [en ligne]. 2020. [Consulté le 16 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://theshiftproject.org/article/ue-declin-approvisionnements-petrole-2030-etude/>
56. LERIDON, Henri. World population outlook: Explosion or implosion? *Population Societies*. 22 janvier 2020. Vol. 573, n° 1, pp. 1-4. Bibliographie_available: 1Cairndomain: www.cairn-int.infoCite Par_available: 0publisher: I.N.E.D
57. IEA. *World Energy Outlook 2021 – Analysis* [en ligne]. International Energy Agency, 2021. [Consulté le 20 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>

58. MAUGERI, Leonardo. *The Shale Oil Boom: A U.S. Phenomenon* [en ligne]. Harvard Kennedy School : Belfer Center for Science and International Affairs, 2013. [Consulté le 21 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.belfercenter.org/publication/shale-oil-boom-us-phenomenon>
59. GRUSHEVENKO, Ekaterina et GRUSHEVENKO, Dmitry. Unconventional Oil Potential Tends to Change the World Oil Market. *Energy Science and Technology*. 31 août 2012. Vol. 4, n° 1, pp. 68-74. DOI 10.3968/j.est.1923847920120401.178.
60. IEA. *World Energy Investment 2019* [en ligne]. International Energy Agency, 2019. [Consulté le 21 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2019>
61. BUREAU OF INFRASTRUCTURE, TRANSPORT AND REGIONAL ECONOMICS. 117 : *Transport energy futures: long-term oil supply trends and projections* [en ligne]. Canberra ACT : Australian Government, Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Local Government, 2009. [Consulté le 21 juin 2022]. Disponible à l'adresse: https://jancovici.com/wp-content/uploads/2016/04/Australian_Govt_Oil_supply_trends.pdfCitation dans rapport
62. NOROUZI, Nima, FANI, Maryam et ZIARANI, Zahra Karami. The fall of oil Age:A scenario planning approach over the last peak oil of human history by 2040. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1 mai 2020. Vol. 188, pp. 106827. DOI 10.1016/j.petrol.2019.106827.
63. THE SHIFT PROJECT. *Approvisionnement pétrolier futur de l'Union Européenne : Etat des réserves et perspectives de production des principaux pays fournisseurs* [en ligne]. Direction Générale des Relations Internationales et de la Stratégie, Ministère des Armées, 2021. [Consulté le 25 avril 2022]. Disponible à l'adresse: <https://theshiftproject.org/article/nouveau-rapport-approvisionnement-petrolier-europe/>
64. IEA. *The Future of Petrochemicals* [en ligne]. International Energy Agency, 2018. [Consulté le 28 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>
65. BENTLEY, R. W. Global oil & gas depletion: an overview. *Energy Policy*. 1 février 2002. Vol. 30, n° 3, pp. 189-205. DOI 10.1016/S0301-4215(01)00144-6.
66. LU, Jialiang, ZHAO, Suping, SUN, Yuping et TANG, Hongjun. Gas production peaks in China: Research and strategic proposals. *Natural Gas Industry B*. 1 juillet 2018. Vol. 5, n° 4, pp. 371-379. DOI 10.1016/j.ngib.2018.01.011.
67. ALEKLETT, Kjell et CAMPBELL, Colin J. The Peak and Decline of World Oil and Gas Production. *Minerals and Energy - Raw Materials Report*. [en ligne]. 5 novembre 2010. [Consulté le 2 juin 2022]. DOI 10.1080/14041040310008374. world
68. MAGGIO, G. et CACCIOLA, G. When will oil, natural gas, and coal peak? *Fuel*. 1 août 2012. Vol. 98, pp. 111-123. DOI 10.1016/j.fuel.2012.03.021.
69. SÖDERBERGH, Bengt, JAKOBSSON, Kristofer et ALEKLETT, Kjell. European energy security: The future of Norwegian natural gas production. *Energy Policy*. 1 décembre 2009. Vol. 37, n° 12, pp. 5037-5055. DOI 10.1016/j.enpol.2009.06.075.
70. SÖDERBERGH, Bengt, JAKOBSSON, Kristofer et ALEKLETT, Kjell. European energy security: An analysis of future Russian natural gas production and exports. *Energy Policy*. 1 décembre 2010. Vol. 38, n° 12, pp. 7827-7843. DOI 10.1016/j.enpol.2010.08.042.
71. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Gas Market Report, Q1-2021*. [en ligne]. OECD, 2021. [Consulté le 27 septembre 2022]. Gas Market Report. ISBN 978-92-64-91305-9.

72. KERSCHNER, Christian, PRELL, Christina, FENG, Kuishuang et HUBACEK, Klaus. Economic vulnerability to Peak Oil. *Global Environmental Change*. 1 décembre 2013. Vol. 23, n° 6, pp. 1424-1433. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2013.08.015.
73. HAMILTON, James D. Historical oil shocks. In : *Routledge Handbook of Major Events in Economic History*. [en ligne]. 1st Edition. Routledge, 2013. pp. 258-284. [Consulté le 26 juin 2022]. ISBN 978-0-203-06787-1. Disponible à l'adresse: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203067871-32/historical-oil-shocks-james-hamilton>
74. AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE (ADEME). *Visions énergie climat 2030/2050 : quels modes de vie pour demain ?* [en ligne]. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2014. [Consulté le 26 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/3246-visions-energie-climat-2030-2050-quels-modes-de-vie-pour-demain--9782358386296.html>
75. LUTZ, Christian, LEHR, Ulrike et WIEBE, Kirsten S. Economic effects of peak oil. *Energy Policy*. 1 septembre 2012. Vol. 48, pp. 829-834. DOI 10.1016/j.enpol.2012.05.017.
76. LANG, Korbinian et AUER, Benjamin R. The economic and financial properties of crude oil: A review. *The North American Journal of Economics and Finance*. 1 avril 2020. Vol. 52, pp. 100914. DOI 10.1016/j.najef.2019.01.011.
77. TVERBERG, Gail E. Oil supply limits and the continuing financial crisis. *Energy*. 1 janvier 2012. Vol. 37, n° 1, pp. 27-34. DOI 10.1016/j.energy.2011.05.049.
78. LYNCH, Michael C. *The « Peak Oil » Scare and the Coming Oil Flood*. . ABC-CLIO, 2016. ISBN 978-1-4408-3187-4. Google-Books-ID: vVylDAAAQBAJ
79. GRAEFE, Laurel. The peak oil debate. *Economic Review*. [en ligne]. 2009. Vol. 94. [Consulté le 27 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.econstor.eu/handle/10419/57664>
80. STERN, David I. Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: A neoclassical interpretation of ecological economics. *Ecological Economics*. 1 juin 1997. Vol. 21, n° 3, pp. 197-215. DOI 10.1016/S0921-8009(96)00103-6.
81. PEARCE, David. Substitution and sustainability: some reflections on Georgescu-Roegen. *Ecological Economics*. septembre 1997. Vol. 22, n° 3, pp. 295-297. DOI 10.1016/S0921-8009(97)00087-6.
82. AYRES, Robert U. On the practical limits to substitution. *Ecological Economics*. 15 février 2007. Vol. 61, n° 1, pp. 115-128. DOI 10.1016/j.ecolecon.2006.02.011.
83. HALL, Charles A. S. et DAY, John W. Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil: In the 1970s a rising world population and the finite resources available to support it were hot topics. Interest faded—but it's time to take another look. *American Scientist*. 2009. Vol. 97, n° 3, pp. 230-237.
84. HALL, Charles et KLITGAARD, Kent. The Need for, and the Growing Importance of, BioPhysical Economics. *Current Analysis on Economics & Finance*. 2019. Vol. 1, pp. 75-87.
85. BRUTEL, Chantal. 1865 : 50 ans d'évolution des résidences principales : des logements plus grands et moins peuplés - Insee Première [en ligne]. Insee, 2021. [Consulté le 27 juin 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5400123>

86. HARCHAOUI, Souhil et CHATZIMPIROS, Petros. Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013. *Journal of Industrial Ecology*. 2019. Vol. 23, n° 2, pp. 412-425. DOI 10.1111/jiec.12760.
87. MAČIULIS, Alminas, VASILIAUSKAS, Aidas Vasilis et JAKUBAUSKAS, Gražvydas. The impact of transport on the competitiveness of national economy. *Transport*. 1 janvier 2009. Vol. 24, n° 2, pp. 93-99. DOI 10.3846/1648-4142.2009.24.93-99.
88. GIANNETTI, B. F., AGOSTINHO, F., ALMEIDA, C. M. V. B. et HUISINGH, D. A review of limitations of GDP and alternative indices to monitor human wellbeing and to manage eco-system functionality. *Journal of Cleaner Production*. 15 janvier 2015. Vol. 87, pp. 11-25. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.10.051.
89. COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. *Traité sur l'Union européenne (version consolidée)*. 13 décembre 2007. 2012/C 326/01.
90. HAMILTON, James D. Historical oil shocks. In : *Routledge Handbook of Major Events in Economic History*. [en ligne]. 1st Edition. Routledge, 2013. pp. 258-284. [Consulté le 26 juin 2022]. ISBN 978-0-203-06787-1. Disponible à l'adresse: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203067871-32/historical-oil-shocks-james-hamilton>
91. SCHWARTZ, Brian S., PARKER, Cindy L., HESS, Jeremy et FRUMKIN, Howard. Public Health and Medicine in an Age of Energy Scarcity: The Case of Petroleum. *American Journal of Public Health*. septembre 2011. Vol. 101, n° 9, pp. 1560-1567. DOI 10.2105/AJPH.2010.205187.
92. MURPHY, David et HALL, Charles. Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1 février 2011. Vol. 1219, pp. 52-72. DOI 10.1111/j.1749-6632.2010.05940.x.
93. HIRSCH, Robert L. Mitigation of maximum world oil production: Shortage scenarios. *Energy Policy*. 1 février 2008. Vol. 36, n° 2, pp. 881-889. DOI 10.1016/j.enpol.2007.11.009.
94. ZINSSTAG, Jakob, CRUMP, Lisa, SCHELLING, Esther, HATTENDORF, Jan, MAIDANE, Yahya Osman, ALI, Kadra Osman et al. Climate change and One Health. *FEMS microbiology letters*. 1 juin 2018. Vol. 365, n° 11. DOI 10.1093/femsle/fny085.
95. POLLARD, Anna E., ROWLISON, Daena L., KOHNEN, Allison, MCGUFFIN, Kaitlin, GELDERT, Christina, KRAMER, Collin et al. Preparing Veterinarians to Address the Health Impacts of Climate Change: Student Perceptions, Knowledge Gaps, and Opportunities. *Journal of Veterinary Medical Education*. juin 2021. Vol. 48, n° 3, pp. 343-350. DOI 10.3138/jvme-2019-0080.
96. KOYTCHIEVA, Maria K., SAUERWEIN, Leah K., WEBB, Tracy L., BAUMGARN, Stacey A., SKEELS, Sadie A. et DUNCAN, Colleen G. A Systematic Review of Environmental Sustainability in Veterinary Practice. *Topics in Companion Animal Medicine*. 1 août 2021. Vol. 44, pp. 100550. DOI 10.1016/j.tcam.2021.100550.
97. HESS, Jeremy, BEDNARZ, Daniel, BAE, Jaeyong et PIERCE, Jessica. Petroleum and Health Care: Evaluating and Managing Health Care's Vulnerability to Petroleum Supply Shifts. *American Journal of Public Health*. 1 septembre 2011. Vol. 101, n° 9, pp. 1568-1579. DOI 10.2105/AJPH.2011.300233.
98. TRIMPOP, R., AUSTIN, E. J. et KIRKCALDY, B. D. Occupational and traffic accidents among veterinary surgeons. *Stress Medicine*. 2000. Vol. 16, n° 4, pp. 243-257. DOI 10.1002/1099-1700(200007)16:4<243::AID-SMI859>3.0.CO;2-T.
99. KATIĆ, Ivan et KRISTIANSEN, Johannes. On means of transport of Danish veterinarians during the last two hundred years. *Historia Medicinae Veterinariae*. 2008. Vol. 33, n° 1, pp. 3-37.

100. REIJULA, Kari, RÄSÄNEN, Kimmo, HÄMÄLÄINEN, Marjut, JUNTUNEN, Kalevi, LINDBOHRM, Marja-Liisa, TASKINEN, Helena, BERGBOM, Barbara et RINTA-JOUPPI, Meeri. Work environment and occupational health of Finnish veterinarians. *American Journal of Industrial Medicine*. 2003. Vol. 44, n° 1, pp. 46-57. DOI 10.1002/ajim.10228.
101. CONSEIL NATIONAL DE L'ORDRE DES VÉTÉRINAIRES. *Atlas démographique | L'Ordre national des vétérinaires* [en ligne]. Conseil national de l'Ordre des vétérinaires, 2022. [Consulté le 18 août 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.veterinaire.fr/la-profession-veterinaire/observatoire-demographique-veterinaire/atlas-demographique>
102. FRUMKIN, Howard, HESS, Jeremy et VINDIGNI, Stephen. Energy and Public Health: The Challenge of Peak Petroleum. *Public Health Reports*. 2009. Vol. 124, n° 1, pp. 5-19.
103. BREEN, Liz, PAPALEXI, Marina et XIE, Ying. Managing the Pharmaceutical Supply Chain—To Sustainability and Beyond. In : BABAR, Zaheer-Ud-Din (éd.), *Global Pharmaceutical Policy*. [en ligne]. Singapore : Springer, 2020. pp. 29-52. [Consulté le 6 juillet 2022]. ISBN 9789811527241.
104. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *The Future of Hydrogen* [en ligne]. International Energy Agency, 2019. [Consulté le 16 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
105. BACCUS, Etienne. Les confrères itinérants ou à domicile subissent de plein fouet la hausse du pétrole. *La Semaine Vétérinaire*. [en ligne]. 4 juillet 2008. N° 1322. [Consulté le 7 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.lepointveterinaire.fr/actualites/actualites-professionnelles/les-confreres-itinerants-ou-a-domicile-subissent-de-plein-fouet-la-hausse-du-petrole.html>
106. LEPOINTVÉTÉRIINAIRE.FR. Sondage de la semaine : Votre activité est-elle fortement impactée par la pénurie d'essence ? *La Semaine Vétérinaire*. [en ligne]. 10 juin 2016. N° 1678. [Consulté le 8 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/la-semaine-veterinaire/article/n-1678/votre-activite-est-elle-fortement-impactee-par-la-penurie-d-essence.html>
107. ARZALIER-DARET, S. Rupture d'approvisionnement en médicaments. *Annales Françaises d'Anesthésie et de Réanimation*. mars 2013. Vol. 32, n° 3, pp. 127-129. DOI 10.1016/j.annfar.2013.01.001.
108. BREEN, Liz. A Preliminary Examination of Risk in the Pharmaceutical Supply Chain (PSC) in the National Health Service (NHS). *Journal of Service Science and Management*. 10 août 2008. Vol. 1, n° 2, pp. 193-199. DOI 10.4236/jssm.2008.12020.
109. HENDRICKS, Kevin B. et SINGHAL, Vinod R. An Empirical Analysis of the Effect of Supply Chain Disruptions on Long-Run Stock Price Performance and Equity Risk of the Firm. *Production and Operations Management*. 2005. Vol. 14, n° 1, pp. 35-52. DOI 10.1111/j.1937-5956.2005.tb00008.x.
110. AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE (ADEME). *Potentiels du véhicule électrique* [en ligne]. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2016. [Consulté le 9 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/2467-potentiels-du-vehicule-electrique.html>
111. ZIEGLER, Micah S. et TRANCIK, Jessika E. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy & Environmental Science*. 21 avril 2021. Vol. 14, n° 4, pp. 1635-1651. DOI 10.1039/D0EE02681F.
112. VARGA, Bogdan Ovidiu, SAGOIAN, Arsen et MARIASIU, Florin. Prediction of Electric Vehicle Range: A Comprehensive Review of Current Issues and Challenges. *Energies*. janvier 2019. Vol. 12, n° 5, pp. 946. DOI 10.3390/en12050946.

113. LONGO, Michela, ZANINELLI, Dario, VIOLA, Fabio, ROMANO, Pietro, MICELI, Rosario, CARUSO, Massimo et PELLITTERI, Filippo. Recharge stations: A review. In : *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. avril 2016. pp.1-8. DOI 10.1109/EVER.2016.7476390.
114. CODA STRATÉGIES. *Infrastructures de recharge pour véhicule électrique*. Direction générale des entreprises, 2018. 381.209 44
115. BLOOMBERGNEF. *Hitting the EV inflection point* [en ligne]. Transport & Environment, 2021. [Consulté le 9 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.transportenvironment.org/discover/hitting-the-ev-inflection-point/>
116. Données sur le parc automobile français au 1er janvier 2021. *Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement et les transports*. [en ligne]. 2021. [Consulté le 11 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-automobile-francais-au-1er-janvier-2021>
117. Nouvelles immatriculations de voitures électriques en France. *Statista*. [en ligne]. 2021. [Consulté le 11 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://fr.statista.com/statistiques/830112/immatriculations-voitures-electriques-hybrides-france/>
118. RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ (RTE). *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France* [en ligne]. Réseau de transport d'électricité (RTE), 2017. [Consulté le 11 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bp2017_complet_vf_compressed.pdf
119. ANDERSSON, Björn A et RÅDE, Ingrid. Metal resource constraints for electric-vehicle batteries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 1 septembre 2001. Vol. 6, n° 5, pp. 297-324. DOI 10.1016/S1361-9209(00)00030-4.
120. GRUBER, Paul W., MEDINA, Pablo A., KEOLEIAN, Gregory A., KESLER, Stephen E., EVERSON, Mark P. et WALLINGTON, Timothy J. Global Lithium Availability. *Journal of Industrial Ecology*. 2011. Vol. 15, n° 5, pp. 760-775. DOI 10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x.
121. NARINS, Thomas P. The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry. *The Extractive Industries and Society*. 1 avril 2017. Vol. 4, n° 2, pp. 321-328. DOI 10.1016/j.exis.2017.01.013.
122. FU, Xinkai, BEATTY, Danielle N., GAUSTAD, Gabrielle G., CEDER, Gerbrand, ROTH, Richard, KIRCHAIN, Randolph E., BUSTAMANTE, Michele, BABBITT, Callie et OLIVETTI, Elsa A. Perspectives on Cobalt Supply through 2030 in the Face of Changing Demand. *Environmental Science & Technology*. 3 mars 2020. Vol. 54, n° 5, pp. 2985-2993. DOI 10.1021/acs.est.9b04975.
123. PETAVRATZI, Evi, GUNN, Gus et KRESSE, Carolin. Cobalt. *BGS commodity review*. 20 novembre 2019. Vol. 37, pp. 201-272.
124. HORN, S., GUNN, A. G., PETAVRATZI, E., SHAW, R. A., EILU, P., TÖRMÄNEN, T., BJERKGÅRD, T., SANDSTAD, J. S., JONSSON, E., KOUNTOURELIS, S. et WALL, F. Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries. *Ore Geology Reviews*. 1 mars 2021. Vol. 130, pp. 103915. DOI 10.1016/j.oregeorev.2020.103915.
125. MUTHUKUMAR, M., RENGARAJAN, N., VELLIYANGIRI, B., OMPRAKAS, M. A., ROHIT, C. B. et KARTHEEK RAJA, U. The development of fuel cell electric vehicles – A review. *Materials Today: Proceedings*. 1 janvier 2021. Vol. 45, pp. 1181-1187. DOI 10.1016/j.matpr.2020.03.679.

126. GAURAV, N., SIVASANKARI, S., KIRAN, GS, NINAWA, A. et SELVIN, J. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 juin 2017. Vol. 73, pp. 205-214. DOI 10.1016/j.rser.2017.01.070.
127. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Transport Biofuels. *IEA*. [en ligne]. 2021. [Consulté le 20 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/transport-biofuels>Transport Biofuels - Analysis and key findings. A report by the International Energy Agency.
128. GUPTA, Anubhuti et VERMA, Jay Prakash. Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 janvier 2015. Vol. 41, pp. 550-567. DOI 10.1016/j.rser.2014.08.032.
129. NAIK, S. N., GOUD, Vaibhav V., ROUT, Prasant K. et DALAI, Ajay K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 février 2010. Vol. 14, n° 2, pp. 578-597. DOI 10.1016/j.rser.2009.10.003.
130. MISHRA, Vijay Kumar et GOSWAMI, Rachna. A review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*. 4 mars 2018. Vol. 9, n° 2, pp. 273-289. DOI 10.1080/17597269.2017.1336350.
131. KOIZUMI, Tatsuji. Biofuels and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 décembre 2015. Vol. 52, pp. 829-841. DOI 10.1016/j.rser.2015.06.041.
132. LENG, Ronald Alfred. Decline in available world resources; implications for livestock production systems in Asia. *Livestock Research for Rural Development*. [en ligne]. 2008. Vol. 20, n° 1. [Consulté le 20 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <http://lrrd.org/lrrd20/1/leng20008.htm>
133. SUBRAMANIAM, Yogeewari, MASRON, Tajul Ariffin et AZMAN, Nik Hadiyan Nik. The impact of biofuels on food security. *International Economics*. 1 décembre 2019. Vol. 160, pp. 72-83. DOI 10.1016/j.inteco.2019.10.003.
134. ADITIYA, H. B., MAHLIA, T. M. I., CHONG, W. T., NUR, Hadi et SEBAYANG, A. H. Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 décembre 2016. Vol. 66, pp. 631-653. DOI 10.1016/j.rser.2016.07.015.
135. UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. Table view - Merchant fleet by flag of registration and by type of ship, annual. *UNCTAD STAT*. [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: https://unctadstat.unctad.org/wds/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=93&IF_Language=eng
136. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *The Future of Trucks* [en ligne]. Rapport technologique. International Energy Agency, 2017. [Consulté le 21 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-trucks>The Future of Trucks - Analysis and key findings. A report by the International Energy Agency.
137. STATISTA. EU: power sector carbon intensity by country 2021. *Statista*. [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.statista.com/statistics/1291750/carbon-intensity-power-sector-eu-country/>
138. ANG, B. W. et SU, Bin. Carbon emission intensity in electricity production: A global analysis. *Energy Policy*. 1 juillet 2016. Vol. 94, pp. 56-63. DOI 10.1016/j.enpol.2016.03.038.
139. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2021* [en ligne]. Rapport technologique. Paris : International Energy Agency, 2021. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

140. TRILLER, Darren M., DONNELLY, James et RUGGE, John. Travel-related savings through a rural, clinic-based automated drug dispensing system. *Journal of Community Health*. décembre 2005. Vol. 30, n° 6, pp. 467-476. DOI 10.1007/s10900-005-7281-4.
141. WOODS, Abigail. Is Prevention Better than Cure? The Rise and Fall of Veterinary Preventive Medicine, c.1950–1980. *Social History of Medicine*. 1 février 2013. Vol. 26, n° 1, pp. 113-131. DOI 10.1093/shm/hks031.
142. O’CATHAIL, Micheal, SIVANANDAN, M. Ananth, DIVER, Claire, PATEL, Poulam et CHRISTIAN, Judith. The Use of Patient-Facing Teleconsultations in the National Health Service: Scoping Review. *JMIR Medical Informatics*. 16 mars 2020. Vol. 8, n° 3, pp. e15380. DOI 10.2196/15380.
143. OHANNESSIAN, Robin, DUONG, Tu Anh et ODONE, Anna. Global Telemedicine Implementation and Integration Within Health Systems to Fight the COVID-19 Pandemic: A Call to Action. *JMIR Public Health and Surveillance*. 2 avril 2020. Vol. 6, n° 2, pp. e18810. DOI 10.2196/18810.
144. ROCA, Rodrigo Y. et MCCARTHY, Robert J. Impact of Telemedicine on the Traditional Veterinarian-Client-Patient Relationship. *Topics in Companion Animal Medicine*. 1 décembre 2019. Vol. 37, pp. 100359. DOI 10.1016/j.tcam.2019.100359.
145. MOREUL, Gwenaële. *Les déserts médicaux vétérinaires : caractérisation qualitative et quantitative dans un objectif de maintien du maillage sanitaire vétérinaire français*. . Thèse de doctorat vétérinaire. Toulouse : Université Paul-Sabatier, 2021. 114 p.
146. GOUTTENOIRE, Lucie, TRUCHET, Stéphanie, BOSCH, Christelle, LARDON, Sylvie, BLASQUIET-REVOL, H., GUILLOT, M., et al. *Projet Veterra Massif Central : vétérinaires et territoires ruraux attractifs*. [en ligne]. Thèse de doctorat vétérinaire. irstea, 2015. 110 p. [Consulté le 15 août 2022]. Disponible à l’adresse: <https://hal.inrae.fr/hal-02602258>
147. SIVARAM, Swaminathan, ROY, Aditi et RAY, Swapan K. The paradox of plastics in healthcare and health. In : *Climate Change and the Health Sector*. Routledge India, 2021. ISBN 978-1-00-319051-6.
148. JOSEPH, Blessy, JAMES, Jemy, KALARIKKAL, Nandakumar et THOMAS, Sabu. Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 1 juillet 2021. Vol. 4, n° 3, pp. 199-208. DOI 10.1016/j.aiepr.2021.06.003.
149. GAMBA, Arianna, NAPIERSKA, Dorota et ZOTINCA, Andreea. *Measuring and reducing plastics in the healthcare sector* [en ligne]. Health Care Without Harm (HCWH), 2021. [Consulté le 15 août 2022]. Disponible à l’adresse: <https://noharm-europe.org/articles/news/europe/measuring-and-reducing-plastics-healthcare-sector>
150. PICO, Victor. *Guide de bonnes pratiques éco-responsable en activité de soins vétérinaires*. Thèse de doctorat vétérinaire. Toulouse : Université Paul-Sabatier, 2016. 125 p.
151. PRESCOTT, John F. History and Current Use of Antimicrobial Drugs in Veterinary Medicine. In : *Antimicrobial Resistance in Bacteria from Livestock and Companion Animals*. [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd, 2018. pp. 1-16. [Consulté le 16 août 2022]. ISBN 978-1-68367-052-0.
152. BEYENE*, Takele et TESEGA, Berihun. Rational veterinary drug use: Its significance in public health. *Journal of Veterinary Medicine and Animal Health*. 31 décembre 2014. Vol. 6, n° 12, pp. 302-308. DOI 10.5897/JVMAH2014.0332.
153. MOQUAY, Viviane. *Maillage vétérinaire et santé animale* [en ligne]. Note de synthèse. Conseil Général de l’Alimentation de l’Agriculture et des Espaces Ruraux (CGAAER), 2016.

[Consulté le 16 août 2022]. Disponible à l'adresse: <https://agriculture.gouv.fr/note-de-synthese-maillage-veterinaire-et-sante-animale>

154. WOLLENSACK, Lea, BUDZINSKI, Kristi et BACKMANN, Jan. Defossilization of pharmaceutical manufacturing. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 1 février 2022. Vol. 33, pp. 100586. DOI 10.1016/j.cogsc.2021.100586.

155. BOZELL, Joseph J. Connecting Biomass and Petroleum Processing with a Chemical Bridge. *Science*. 30 juillet 2010. Vol. 329, n° 5991, pp. 522-523. DOI 10.1126/science.1191662.

156. GEYER, Roland, JAMBECK, Jenna R. et LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 19 juillet 2017. Vol. 3, n° 7, pp. e1700782. DOI 10.1126/sciadv.1700782.

157. KLINE, A B. Will shortages of raw materials and rising prices hurt our chances for better health care? *Public Health Reports*. 1975. Vol. 90, n° 1, pp. 3-9.

158. CLARK, G B et KLINE, B. Impact of oil shortage on plastic medical supplies. *Public Health Reports*. 1981. Vol. 96, n° 2, pp. 111-115. Imagesnull

159. BERTON, A. L. DISPOSABLE SYRINGE AND NEEDLE SUPPLIES. *The Lancet*. 23 février 1974. Vol. 303, n° 7852, pp. 317. DOI 10.1016/S0140-6736(74)92631-2.

160. HANLON, P. et MCCARTNEY, G. Peak oil: Will it be public health's greatest challenge? *Public Health*. 1 juillet 2008. Vol. 122, n° 7, pp. 647-652. DOI 10.1016/j.puhe.2008.03.020.

161. AMAT, Jean-Philippe. *La clinique vétérinaire et le développement durable*. . Thèse de doctorat vétérinaire. Lyon : Université Claude-Bernard Lyon I, 2009. L-2009-012Book Title: La clinique vétérinaire et le développement durable

162. CNRTL. Définition de AGRICULTURE. *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL)*. [en ligne]. [Consulté le 18 août 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.cnrtl.fr/definition/AGRICULTURE>

163. ENTICOTT, Gareth, DONALDSON, Andrew, LOWE, Philip, POWER, Megan, PROCTOR, Amy et WILKINSON, Katy. The changing role of veterinary expertise in the food chain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 12 juillet 2011. Vol. 366, n° 1573, pp. 1955-1965. DOI 10.1098/rstb.2010.0408.

164. KIM, Eunhye, ARNOUX, Mathieu et CHATZIMPIROS, Petros. Agri-food-energy system metabolism: a historical study for northern France, from nineteenth to twenty-first centuries. *Regional Environmental Change*. avril 2018. Vol. 18, n° 4, pp. 1009-1019. DOI 10.1007/s10113-017-1119-3.

165. HARCHAOUI, Souhil et CHATZIMPIROS, Petros. Can Agriculture Balance Its Energy Consumption and Continue to Produce Food? A Framework for Assessing Energy Neutrality Applied to French Agriculture. *Sustainability*. décembre 2018. Vol. 10, n° 12, pp. 4624. DOI 10.3390/su10124624.

166. ARIZPE, Nancy, GIAMPIETRO, Mario et RAMOS-MARTIN, Jesus. Food Security and Fossil Energy Dependence: An International Comparison of the Use of Fossil Energy in Agriculture (1991-2003). *Critical Reviews in Plant Sciences*. 1 janvier 2011. Vol. 30, n° 1-2, pp. 45-63. DOI 10.1080/07352689.2011.554352.

167. NARDONE, Alessandro. Evolution of livestock production and quality of animal products. *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Brazilian Society of Animal Science*. 2002. pp. 486-513.

168. HARCHAOUI, Souhil et CHATZIMPIROS, Petros. Reconstructing production efficiency, land use and trade for livestock systems in historical perspective. The case of France, 1961–2010. *Land Use Policy*. 1 septembre 2017. Vol. 67, pp. 378-386. DOI 10.1016/j.landusepol.2017.05.028.
169. CAILLAVET, France, FADHUILE, Adélaïde et NICHÈLE, Véronique. L'évolution de la consommation de produits animaux en France : de multiples enjeux. *INRAE Productions Animales*. 2019. Vol. 32, n° 2, pp. 131-146. DOI <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2502>.
170. ESMAEILI, Abdoukarim et SHOKOOHI, Zainab. Assessing the effect of oil price on world food prices: Application of principal component analysis. *Energy Policy*. 1 février 2011. Vol. 39, n° 2, pp. 1022-1025. DOI 10.1016/j.enpol.2010.11.004.
171. ALGHALITH, Moawia. The interaction between food prices and oil prices. *Energy Economics*. 1 novembre 2010. Vol. 32, n° 6, pp. 1520-1522. DOI 10.1016/j.eneco.2010.08.012.
172. ZMAMI, Mourad et BEN-SALHA, Ousama. Does Oil Price Drive World Food Prices? Evidence from Linear and Nonlinear ARDL Modeling. *Economies*. mars 2019. Vol. 7, n° 1, pp. 12. DOI 10.3390/economies7010012.
173. LENG, Ronald Alfred. Implications of the decline in world oil reserves for future world livestock production. In : *Recent Advances in Animal Nutrition in Australia*. 2005. pp. 95-105.
174. NEFF, Roni A., PARKER, Cindy L., KIRSCHENMANN, Frederick L., TINCH, Jennifer et LAWRENCE, Robert S. Peak Oil, Food Systems, and Public Health. *American Journal of Public Health*. septembre 2011. Vol. 101, n° 9, pp. 1587-1597. DOI 10.2105/AJPH.2011.300123.
175. ROWLINSON, Peter. Adapting livestock production systems to climate change - temperate zones. *Livestock and global change*. 1 janvier 2008. pp. 61-63.
176. HOLECHEK, Jerry L. Range Livestock Production, Food, and the Future: A Perspective. *Rangelands*. décembre 2009. Vol. 31, n° 6, pp. 20-25. DOI 10.2111/1551-501X-31.6.20.
177. KONGSHAUG, Gunnar. Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. *IFA Tech. Conf., Marrakech, Morocco, 1998*. [en ligne]. 1998. [Consulté le 26 août 2022]. Disponible à l'adresse: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543025728735488>
178. ÉVA, Csaba, OSZVALD, Mária et TAMÁS, László. Current and possible approaches for improving photosynthetic efficiency. *Plant Science*. 1 mars 2019. Vol. 280, pp. 433-440. DOI 10.1016/j.plantsci.2018.11.010.
179. MURCHIE, E. H., PINTO, M. et HORTON, P. Agriculture and the new challenges for photosynthesis research. *New phytologist*. [en ligne]. 2009. [Consulté le 26 août 2022]. Disponible à l'adresse: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02705.x>
180. LEISTER, Dario. How Can the Light Reactions of Photosynthesis be Improved in Plants? *Frontiers in Plant Science*. [en ligne]. 2012. Vol. 3. [Consulté le 26 août 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2012.00199>
181. ZARGAR, Sajad Majeed, GUPTA, Nancy, NAZIR, Muslima, MAHAJAN, Reetika, MALIK, Firdose A., SOFI, Nageebul R., SHIKARI, Asif B. et SALGOTRA, R. K. Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant Gene*. 1 septembre 2017. Vol. 11, pp. 154-159. DOI 10.1016/j.plgene.2017.04.003.
182. HUSSAIN, Sajad, ULHASSAN, Zaid, BRESTIC, Marian, ZIVCAK, Marek, WEIJUN ZHOU, ALLAKHVERDIEV, Suleyman I., YANG, Xinghong, SAFDAR, Muhammad Ehsan, YANG, Wenyu et LIU,

- Weiguo. Photosynthesis research under climate change. *Photosynthesis Research*. 1 décembre 2021. Vol. 150, n° 1, pp. 5-19. DOI 10.1007/s11120-021-00861-z.
183. SCOLARO, Elia, BELIGOJ, Matteo, ESTEVEZ, Manuel Perez, ALBERTI, Luigi, RENZI, Massimiliano et MATTETTI, Michele. Electrification of Agricultural Machinery: A Review. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9, pp. 164520-164541. DOI 10.1109/ACCESS.2021.3135037.
184. PIMENTEL, David, WHITECRAFT, Michele, SCOTT, Zachary R., ZHAO, Leixin, SATKIEWICZ, Patricia, SCOTT, Timothy J., PHILLIPS, Jennifer, SZIMAK, Daniel, SINGH, Gurpreet, GONZALEZ, Daniela O. et MOE, Tun Lin. Will Limited Land, Water, and Energy Control Human Population Numbers in the Future? *Human Ecology*. 1 octobre 2010. Vol. 38, n° 5, pp. 599-611. DOI 10.1007/s10745-010-9346-y.
185. WRIGHT, Julia. *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. ISBN 978-1-84977-273-0.
186. FRIEDRICH, Jörg. Global energy crunch: How different parts of the world would react to a peak oil scenario. *Energy Policy*. 1 août 2010. Vol. 38, n° 8, pp. 4562-4569. DOI 10.1016/j.enpol.2010.04.011.
187. Chapter 1. Cuba: Providing the Model for a Post-Petroleum Food System ? In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 1-10. ISBN 978-1-84977-273-0.
188. Chapter 4. The Historical Context: Cuban Agriculture and Food Systems. In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 49-79. ISBN 978-1-84977-273-0.
189. HENRIKSSON, Maria et LINDHOLM, Eva-Lotta. The use and role of animal draught power in Cuban agriculture, a field study in Havana province. *Minor Field Studies*. 2000. Vol. 100, pp. 46.
190. Chapter 6. From Dependency to Greater Self-reliance : Transformation of the Cuban Food System. In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 93-134. ISBN 978-1-84977-273-0.
191. Chapter 3. Researching Cuba. In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 42-48. ISBN 978-1-84977-273-0.
192. Chapter 7. Cuban Food Production in the 1990s: A Patchwork of Approaches. In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 135-167. ISBN 978-1-84977-273-0.
193. BOTELLA-RODRÍGUEZ, Elisa. Food Import Dependency in Cuba: Still the 'Achilles' Heel of the Revolution'? *Bulletin of Latin American Research*. 2019. Vol. 38, n° 2, pp. 192-207. DOI 10.1111/blr.12848.
194. Chapter 5. Life After the Crisis: The Rise of Urban Agriculture. In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 81-92. ISBN 978-1-84977-273-0.
195. STARKEY, Paul, RÍOS, Arcadio, VALDÉS, Humberto et SOTTO, Pedro. The importance of horses, mules and donkeys in modern Cuba. . 2002. pp. 8.
196. Chapter 10. Lessons for the Future: Cuba Ten Years On. In : WRIGHT, Julia, *Sustainable Agriculture and Food Security in an Era of Oil Scarcity: Lessons from Cuba*. London : Routledge, 2008. pp. 225-242. ISBN 978-1-84977-273-0.

197. SIMS, Ralph EH. « *Energy-Smart* » *Food for People and Climate - Issue Paper* [en ligne]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011. [Consulté le 6 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.fao.org/sustainable-food-value-chains/library/details/fr/c/266092/>
198. DAR, R. A., PARMAR, M., DAR, E. A., SANI, R. K. et PHUTELA, U. G. Biomethanation of agricultural residues: Potential, limitations and possible solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 janvier 2021. Vol. 135, pp. 110217. DOI 10.1016/j.rser.2020.110217.
199. FREDRIKSSON, H., BAKY, A., BERNESSON, S., NORDBERG, Å., NORÉN, O. et HANSSON, P. -A. Use of on-farm produced biofuels on organic farms – Evaluation of energy balances and environmental loads for three possible fuels. *Agricultural Systems*. 1 juillet 2006. Vol. 89, n° 1, pp. 184-203. DOI 10.1016/j.agsy.2005.08.009.
200. Poules pondeuses : production d'œufs de consommation. *Agreste*. [en ligne]. [Consulté le 12 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/POULESPONDEUSES#query/open/POULESPONDEUSES>
201. Volailles et lapins : productions et abattages. *Agreste*. [en ligne]. [Consulté le 12 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/VOLAILLES_ABATT#query/open/VOLAILLES_ABATT
202. Animaux de boucherie : Abattage et Production. *Agreste*. [en ligne]. [Consulté le 12 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/GROSANIMAUX#query/open/GROSANIMAUX>
203. BOUZIANI, Zoubir. 1712 : *L'activité des vétérinaires : de plus en plus urbaine et féminisée - Insee Première* [en ligne]. Insee, 2018. [Consulté le 4 novembre 2020]. Disponible à l'adresse: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3621973#titre-bloc-13>
204. Les chiffres du lait en France. *Chambres d'Agriculture France*. [en ligne]. 8 septembre 2022. [Consulté le 13 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://chambres-agriculture.fr/actualites/toutes-les-actualites/detail-de-lactualite/actualites/les-chiffres-du-lait-en-france-1/>
205. DAKPO, K Hervé, JEANNEAUX, Philippe, LATRUFFE, Laure, MOSNIER, Claire et VEYSSET, Patrick. Three decades of productivity change in French beef production: a Färe-Primont index decomposition. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*. 2018. Vol. 62, n° 3, pp. 352-372. DOI 10.1111/1467-8489.12264.
206. FRANCEAGRIMER. *Viande Bovine : fiche filière* [en ligne]. FranceAgriMer, 2022. [Consulté le 13 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: https://www.franceagrimer.fr/content/download/63283/document/FICHE%20FILIERE%20BOVINE%202020_EN%20-%20HD.PDF
207. COZZI, G. Present situation and future challenges of beef cattle production in Italy and the role of the research. *Italian Journal of Animal Science*. 1 janvier 2007. Vol. 6, n° sup1, pp. 389-396. DOI 10.4081/ijas.2007.1s.389.
208. ROGUET, Christine, GAIGNÉ, Carl, CHATELLIER, Vincent, CARIOU, Sylvain, CARLIER, Marie, CHENU, R, DANIEL, Karine et PERROT, Christophe. Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes : état des lieux et facteurs explicatifs. *INRA Productions Animales*. 2015. Vol. 28, n° 1, pp. 5-22.

209. DUMONT, B., FORTUN-LAMOTHE, L., JOUVEN, M., THOMAS, M. et TICHIT, M. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *animal*. juin 2013. Vol. 7, n° 6, pp. 1028-1043. DOI 10.1017/S1751731112002418.
210. BLANCARD, Stéphane, BOUSSEMARY, Jean-Philippe, BRIEC, Walter et KERSTENS, Kristiaan. Short- and Long-Run Credit Constraints in French Agriculture: A Directional Distance Function Framework Using Expenditure-Constrained Profit Functions. *American Journal of Agricultural Economics*. 2006. Vol. 88, n° 2, pp. 351-364. DOI 10.1111/j.1467-8276.2006.00863.x.
211. KANDER, Astrid et WARDE, Paul. Number, Size and Energy Consumption of Draught Animals in European Agriculture. *Centre for History and Economics Working Paper*. 2009. pp. 1-29.
212. VIJAYAVENKATARAMAN, S., INIYAN, S. et GOIC, Ranko. A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 janvier 2012. Vol. 16, n° 1, pp. 878-897. DOI 10.1016/j.rser.2011.09.009.
213. TEMPER, Leah, FONSECA, Susana et COELHO, Ricardo. A New EJOLT Report: Towards a Post-Oil Civilization. Yasunization and Other Initiatives to Leave Fossil Fuels in the Soil. *e-cadernos CES*. [en ligne]. 1 septembre 2012. N° 17. [Consulté le 16 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://journals.openedition.org/eces/1231>
214. COUTURIER, Christian, CHARRU, Madeleine, DOUBLET, Sylvain et POINTEREAU, Philippe. *Afterres 2050* [en ligne]. Association Solagro, 2016. [Consulté le 19 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://afterres2050.solagro.org/decouvrir/scenario/>
215. SAYED, Enas Taha, WILBERFORCE, Tabbi, ELSAID, Khaled, RABAIA, Malek Kamal Hussien, ABDELKAREEM, Mohammad Ali, CHAE, Kyu-Jung et OLABI, A. G. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of The Total Environment*. 20 avril 2021. Vol. 766, pp. 144505. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.144505.
216. BROOK, Barry W., ALONSO, Agustin, MENELEY, Daniel A., MISAK, Jozef, BLEES, Tom et VAN ERP, Jan B. Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*. 1 décembre 2014. Vol. 1-2, pp. 8-16. DOI 10.1016/j.susmat.2014.11.001.
217. PEÑUELAS, Josep et CARNICER, Jofre. Climate Change and Peak Oil: The Urgent Need for a Transition to a Non-Carbon-Emitting Society. *AMBIO*. 1 février 2010. Vol. 39, n° 1, pp. 85-90. DOI 10.1007/s13280-009-0011-x.
218. NORTH, Peter. Eco-localisation as a progressive response to peak oil and climate change – A sympathetic critique. *Geoforum*. 1 juillet 2010. Vol. 41, n° 4, pp. 585-594. DOI 10.1016/j.geoforum.2009.04.013.
219. HALL, Charles A. S., POWERS, Robert et SCHOENBERG, William. Peak Oil, EROI, Investments and the Economy in an Uncertain Future. In : PIMENTEL, David (éd.), *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks*. [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands, 2008. pp. 109-132. [Consulté le 12 octobre 2022]. ISBN 978-1-4020-8654-0.
220. MEADOWS, Donella H., MEADOWS, Dennis L., RANDERS, Jørgen et III, William W. Behrens. The Limits to Growth - Club of Rome. [en ligne]. 1 janvier 1972. [Consulté le 1 octobre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://policycommons.net/artifacts/1529440/the-limits-to-growth/2219251/>
221. OLIVER, Kathryn, LORENC, Theo et INNVÆR, Simon. New directions in evidence-based policy research: a critical analysis of the literature. *Health Research Policy and Systems*. 14 juillet 2014. Vol. 12, n° 1, pp. 34. DOI 10.1186/1478-4505-12-34.

222. BRADSHAW, G. A. et BORCHERS, Jeffrey G. Uncertainty as Information: Narrowing the Science-policy Gap. *Conservation Ecology*. [en ligne]. 2000. Vol. 4, n° 1. [Consulté le 1 octobre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.jstor.org/stable/26271749>
223. SUTHERLAND, William J. et WORDLEY, Claire F. R. Evidence complacency hampers conservation. *Nature Ecology & Evolution*. septembre 2017. Vol. 1, n° 9, pp. 1215-1216. DOI 10.1038/s41559-017-0244-1.
224. WELLSTEAD, Adam, CAIRNEY, Paul et OLIVER, Kathryn. Reducing ambiguity to close the science-policy gap. *Policy Design and Practice*. 3 avril 2018. Vol. 1, n° 2, pp. 115-125. DOI 10.1080/25741292.2018.1458397.
225. GRANT, Lyle K. Peak Oil as a Behavioral Problem. *Behavior and Social Issues*. 1 mai 2007. Vol. 16, n° 1, pp. 65-89. DOI 10.5210/bsi.v16i1.405.
226. OSBORNE, Darren. Companion animal client numbers continue to fall in most provinces. *The Canadian Veterinary Journal*. octobre 2011. Vol. 52, n° 10, pp. 1143-1145.
227. HURSTEL, Oriane. Décroissance des consultations vétérinaires aux États-Unis en 2009-2010. *La Semaine Vétérinaire*. 2012. N° 1478, pp. 15.
228. KHUDAYKULOVA, Madina, YUANQIONG, He, KHUDAYKULOV, Akmal et OBRENOVIC, Bojan. Economic Consequences and Implications of the Ukraine-Russia War. . 1 mai 2022. Vol. 8, pp. 44-52.
229. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Coordinated actions across Europe are essential to prevent a major gas crunch: Here are 5 immediate measures. *IEA*. [en ligne]. 18 juillet 2022. [Consulté le 16 octobre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.iea.org/commentaries/coordinated-actions-across-europe-are-essential-to-prevent-a-major-gas-crunch-here-are-5-immediate-measures> Coordinated actions across Europe are essential to prevent a major gas crunch: Here are 5 immediate measures - A commentary by Dr Fatih Birol
230. OZILI, Peterson K. *Global Economic Consequence of Russian Invasion of Ukraine*. [en ligne]. SSRN Scholarly Paper. 2022. Rochester, NY. 4064770. [Consulté le 16 octobre 2022].
231. CAMPBELL, C. J. The Rimini Protocol an oil depletion protocol: Heading off economic chaos and political conflict during the second half of the age of oil. *Energy Policy*. 1 août 2006. Vol. 34, n° 12, pp. 1319-1325. DOI 10.1016/j.enpol.2006.02.005.
232. WILMET, Bernard. Les dessous de l'industrie pétrolière sont dévoilés aux praticiens parisiens. *La Semaine Vétérinaire*. [en ligne]. 2008. N° 1314. [Consulté le 17 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/la-semaine-veterinaire/article/n-1314/les-dessous-de-l-industrie-petroliere-sont-devoiles-aux-praticiens-parisiens.html>
233. JAMIN, Franck. Pour près de 80 % des vétonautes, le réchauffement climatique est réel. *La Semaine Vétérinaire*. [en ligne]. 2011. N° 1468. [Consulté le 19 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/la-semaine-veterinaire/article/n-1468/pour-pres-de-80-percent-des-ve-tonautes-le-rechauffement-climatique-est-reel.html>
234. DEVOS, Nathalie. Retour vers le futur. *La Semaine Vétérinaire*. 2016. N° 1687, pp. 46-51.
235. SALTMAN, R., ANDRUS, D. M., GWINNER, K. P. et PRINCE, J. B. The Future of Food Supply Veterinary Medicine: *American Association of Bovine Practitioners Proceedings of the Annual Conference*. 21 septembre 2006. pp. 20-27. DOI 10.21423/aabpro20064656.
236. STATHAM, Jonathan et GREEN, Martin. Cattle veterinary services in a changing world. *Veterinary Record*. mars 2015. Vol. 176, n° 11, pp. 276-280. DOI 10.1136/vr.h719.

237. WOODWARD, Hannah, COBB, Kate et REMNANT, John. The future of cattle veterinary practice: insights from a qualitative study. *Veterinary Record*. 2019. Vol. 185, n° 7, pp. 205-205. DOI 10.1136/vr.105321.
238. GLISSON, John R. et HOFACRE, Charles L. The Future of Veterinary Medicine in Poultry Production. *Journal of Veterinary Medical Education*. 1 décembre 2006. Vol. 33, n° 4, pp. 492-495. DOI 10.3138/jvme.33.4.492.
239. VETFUTURS FRANCE. *VetFuturs France - Le Livre Blanc* [en ligne]. 2017. [Consulté le 20 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://vetfutursfrance.fr/ressources/>
240. The future of wearable healthcare in the veterinary profession. *Veterinary Record*. novembre 2015. Vol. 177, n° 20, pp. 513-514. DOI 10.1136/vr.h6220.
241. Page d'accueil | L'Ordre national des vétérinaires. *Ordre national des vétérinaires*. [en ligne]. [Consulté le 21 septembre 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.veterinaire.fr/>
242. ZAMBERLAN, João, JANDREY, Kiara, PASINI, Mauricio, BORTOLOTTI, Rafael, SALAZAR, Ludmila, SILVA, Aline, GIACOMOLLI, Camila et SALAZAR, Rodrigo. Perception of undergraduate from veterinary medicine course about sustainability in the training of the future veterinarian. *International Journal for Innovation Education and Research*. 5 avril 2018. Vol. 6, pp. 32-41. DOI 10.31686/ijer.vol6.iss3.981.
243. DEUFFIC, Philippe et CANDAU, Jacqueline. Farming and Landscape Management: How French Farmers are Coping with the Ecologization of Their Activities. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. 1 octobre 2006. Vol. 19, n° 6, pp. 563-585. DOI 10.1007/s10806-006-9010-0.
244. GAYMARD, Sandrine, GOUJON, Boris et LEFEBVRE, Marianne. Adherence to Environmental Regulation in the European Union Common Agricultural Policy: Social Representations and Conditionality among French Farmers. *Journal of Agricultural & Food Information*. 27 octobre 2020. Vol. 21, n° 3-4, pp. 104-125. DOI 10.1080/10496505.2020.1772078.
245. PRESTON, Reg et LENG, Ron. Adapting livestock production systems to climate change - tropical zones. *Livestock and global change*. 1 janvier 2008. pp. 56-60.
246. DUVAL, J. E., BAREILLE, N., FOURICHON, C., MADOUASSE, A. et VAARST, M. How can veterinarians be interesting partners for organic dairy farmers? French farmers' point of views. *Preventive Veterinary Medicine*. 1 octobre 2017. Vol. 146, pp. 16-26. DOI 10.1016/j.prevetmed.2017.07.013.
247. SULPICE, P., DELACROIX, M., CAILLAUX, T. et SEON, P. Le conseil en élevage dans la pratique quotidienne vétérinaire. L'expérience des groupes vétérinaires conventionnés. *Renc. Rech. Ruminants*. 1999. Vol. 6, pp. 4.
248. DUMAS, P.L. et SULPICE, P. Success stories : La convention : Pour contractualiser l'activité vétérinaire en collectif. Comparatif convention / libéral. *Journées Nationales GTV - Reims 2017*. 2017. pp. 233-242.

APPROVISIONNEMENT DE NOS SOCIÉTÉS EN PÉTROLE ET AVENIR : QUELLES CONSÉQUENCES SUR LA PROFESSION VÉTÉRINAIRE ?

Auteur

MISTRAL Jolan

Résumé

Le pétrole est une ressource aux caractéristiques physiques exceptionnelles qui a fondamentalement contribué au développement des sociétés occidentales et à la mondialisation depuis le milieu du XXe siècle. Cependant, cette ressource ayant des stocks par nature limités, son niveau de production atteindra nécessairement un maximum avant d'amorcer un déclin en rupture avec la tendance précédente, phénomène appelé « pic pétrolier ». Des études récentes et rigoureuses estiment que ce pic se produira avant 2040 et bouleversera profondément la société, aucune autre forme d'énergie n'étant aujourd'hui à même de complètement se substituer au pétrole.

Les activités vétérinaires manifestent des dépendances directes et indirectes à la disponibilité de cette ressource et un déclin continu dans son approvisionnement ne manquera pas d'entraîner des conséquences importantes sur la profession qui devra s'adapter. La facilité de déplacement, la disponibilité en produits médicaux ainsi que le système d'élevage actuel conditionnant une partie des activités vétérinaires seront fortement altérés.

Cette étude bibliographique se propose de balayer l'ensemble de la problématique du pic pétrolier afin d'en dresser une compréhension globale et d'étudier la plausibilité d'un certain nombre d'évolutions et d'adaptations envisageables concernant le milieu vétérinaire. Elle soulève la sévérité du phénomène, sa proximité avec d'autres enjeux environnementaux et le manque de préparation manifeste de l'ensemble du système économique et de la profession vétérinaire. L'étude rigoureuse de cette problématique semble nécessiter une approche scientifiquement transversale et de décroisonner les champs d'étude.

Mots-clés

Pétrole, Médecine, Vétérinaire, Energie, Agriculture, Projection

Jury

Président du jury : Pr CALENDER Alain

1er assesseur : Pr REMY Denise

2ème assesseur : Dr BRUYERE Pierre